

(19)日本国特許庁 (JP)

(12) 公表特許公報 (A)

(11)特許出願公表番号  
特表2001-500628  
(P2001-500628A)

(43)公表日 平成13年1月16日 (2001.1.16)

(51)Int.Cl.  
G 0 2 B 21/00  
G 0 3 F 7/20  
H 0 1 L 21/027

識別記号  
5 0 5

P I  
G 0 2 B 21/00  
G 0 3 F 7/20  
H 0 1 L 21/30

マーク (参考)  
5 0 5  
5 1 8

審査請求 未請求 予備審査請求 有 (全 82 頁)

(21)出願番号 特願平9-532621  
(86) (22)出願日 平成9年2月20日(1997.2.20)  
(85)翻訳文提出日 平成10年8月28日(1998.8.28)  
(86)国際出願番号 PCT/US97/02949  
(87)国際公開番号 WO97/34171  
(87)国際公開日 平成9年9月18日(1997.9.18)  
(31)優先権主張番号 60/012,434  
(32)優先日 平成8年2月28日(1996.2.28)  
(33)優先権主張国 米国(US)

(71)出願人 ションソン ケニス シー  
アメリカ合衆国 カリフォルニア州  
95051 サンタ クララ ロバートソン  
ロード 2502  
(72)発明者 ションソン ケニス シー  
アメリカ合衆国 カリフォルニア州  
95051 サンタ クララ ロバートソン  
ロード 2502  
(74)代理人 弁理士 中村 稔 (外6名)

最終頁に続く

(54)【発明の名称】マイクロリトグラフィ用マイクロレンズスキャナ及び広フィールド共焦点顕微鏡

(57)【要約】

極めて小さい開口数及び大きいイメージフィールドを有する低分解能イメージ投影システムを、各々が大きい開口数を有するが極めて小さいフィールドを有するマイクロレンズアレイ(2)と共に使用する顕微鏡またはリトリトグラフィシステム。投影システムは小さい開口ストップ(7)を含み、この開口ストップはマイクロレンズ(2)によって、顕微鏡サンプル(6)または印刷表面(12)上のマイクロレンズ焦点位置にある回折制限されたマイクロスポットのアレイ上にイメージされ、表面は焦点アレイから完全ラスタイメージを構築するために走査される。システム設計は、伝統的な広フィールド、高NA顕微鏡及びマイクロリトグラフィシステムの複雑さ及び費用の主因であるイメージ分解能とフィールドサイズとの間のトレードオフを緩和する。システムは、平坦なフィールド、ひずみの無いイメージングを、従来のイメージングシステムの実際の限界よりも大きいイメージフィールド全体にわたる正確なオーバレイ、合焦、及び反り補償と共に可能にする。イメージ版としてデジタルマイクロミラーデバイスを使用し、半導体製造にお

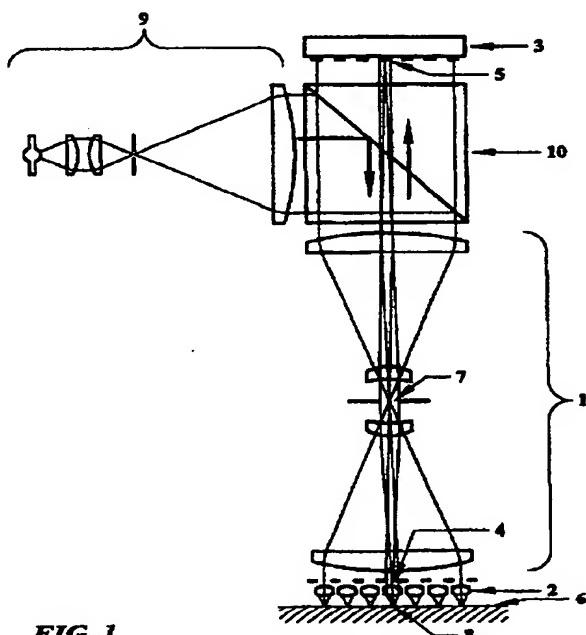


FIG. 1

**【特許請求の範囲】****1. イメージングシステムにおいて、**

対物面と、上記対物面と共に役するイメージ面と、投影開口と呼ぶ制限用開口  
ストップとを有する光学投影システムを含み、

マイクロレンズ開口アレイを限定する開口をそれぞれが有するマイクロレンズの平面アレイを含み、上記開口アレイは上記投影システムの対物面に位置決めされており、上記マイクロレンズはそれぞれ上記投影開口と共に役する焦点を有していて焦点アレイを限定しており、

上記マイクロレンズアレイと、上記焦点アレイに近接するイメージングサンプルとの間の相対運動を確立する走査メカニズムを含み、上記サンプルに対して上記焦点が横切る経路は極めて接近して離間しているラスタ線のセットからなり、

感光検出器要素のアレイからなる検出器を含み、上記検出器は上記投影システムのイメージ面に位置決められており、上記投影システムは各マイクロレンズ開口を対応する検出器要素上にイメージし、上記検出器要素は対応するマイクロレンズ焦点に近接する上記サンプル上の、または上記サンプル内のマイクロスポットから発する光に応答するようになっており、

上記サンプルと上記マイクロレンズアレイとの間の相対運動を確立するよう  
に上記走査メカニズムが動作するにつれて上記検出器の応答を記録するデータ  
収集システムを含み、それによって上記サンプルの高分解能ラスタイメージが  
合成されるようになっていることを特徴とするイメージングシステム。

**2. 照明システムを更に含み、上記マイクロレンズアレイ及び上記投影システム  
は更に、上記照明システムからの光を上記マイクロスポット上に合焦させてサン  
プル照明を行うように構成されている請求項1に記載のイメージングシス  
テム。**

**3. 上記照明システムからの光を上記投影システムの光路に併合するように配置  
されているビームスプリッタを更に含み、このように併合された光及び上記サ  
ンプルから反射したイメージ光は、上記ビームスプリッタと上記サンプルとの**

間で同一の光路を通過するようになっている請求項2に記載のイメージングシステム。

4. 上記全てのマイクロレンズは同一の焦点距離を有しており、上記焦点は全て上記走査方向に平行な共通焦平面内にあり、それによって上記システムは、上記サンプル上の、または上記サンプル内の選択された合焦深さにおいて高分解能イメージングを達成するようになっている請求項1に記載のイメージングシステム。
5. 照明色度を上記走査運動と同時に変更するメカニズムを更に含み、上記各ラスタ線は複数のマイクロレンズによって走査され、上記連続走査から多色または複数波長のイメージが合成されるようになっている請求項2に記載のイメージングシステム。
6. 上記各ラスタ線は、異なる焦点距離を有する複数のマイクロレンズによって走査され、上記サンプル上の、または上記サンプル内の異なる合焦深さにおいて走査されたイメージを組合わせることによって三次元イメージ情報が合成されるようになっている請求項1に記載のイメージングシステム。
7. 上記各ラスタ線は複数のマイクロレンズによって走査され、  
上記全てのマイクロレンズは同一の焦点距離を有しており、上記焦点は全て上記走査方向に傾いた共通焦平面内にあり、  
上記サンプル上の、または上記サンプル内の異なる合焦深さにおいて走査されたイメージを組合わせることによって三次元イメージ情報が合成されるようになっている  
請求項1に記載のイメージングシステム。
8. 印刷システムにおいて、  
対物面と、上記対物面と共に役するイメージ面と、投影開口と呼ぶ制限用開口  
ストップとを有する光学投影システムを含み、  
マイクロレンズ開口アレイを限定する開口をそれぞれが有するマイクロレンズの平面アレイを含み、上記開口アレイは上記投影システムのイメージ面に位置決めされており、上記マイクロレンズはそれぞれ上記投影開口と共に役する焦点を有していて焦点アレイを限定しており、

上記マイクロレンズアレイと、上記焦点アレイに近接する印刷表面との間の相対運動を確立する走査メカニズムを含み、上記印刷表面に対して上記焦点が横切る経路は極めて接近して離間したラスタ線のセットからなり、

光変調イメージ源要素のアレイからなるイメージ源を含み、上記イメージ源は上記投影システムの対物面に位置決めされており、上記投影システムは各イメージ源要素を対応するマイクロレンズ開口上にイメージして上記対応するマイクロレンズ焦点に近接する上記印刷表面上のマイクロスポット上の光レベルを制御するようになっており、

上記印刷表面が走査されるにつれて上記イメージ源を制御するイメージ変調メカニズムを含み、それによって、上記印刷表面内に感光材料が位置決めされた時に、上記感光材料上に合成された高分解能ラスタイメージが記録されるようになっている

ことを特徴とする印刷システム。

9. 上記感光材料は、平面基体上のフォトレジストである請求項8に記載の印刷システム。
10. 上記基体は、半導体ウェーハである請求項9に記載の印刷システム。
11. 上記投影開口のサイズ及び形状は、上記各イメージ源要素によってその対応するマイクロレンズ開口上に発生される回折制限された振幅分布が、隣接するマイクロレンズ開口上にノードを有するように決定されており、それによって上記隣接するマイクロレンズ内への光漏洩が最小になるようにした請求項8に記載の印刷システム。
12. 上記投影開口は、上記隣接するマイクロレンズ開口内への光漏洩を最小にするようにアボダイズする請求項8に記載の印刷システム。
13. 上記イメージ源を照明する照明システムを更に含み、上記照明は上記イメージ源要素によって変調され、上記投影システム及びマイクロレンズアレイによって上記印刷表面上へ伝送されるようになっている請求項8に記載の印刷システム。
14. 上記請求項8に記載の上記走査メカニズムは第1の走査メカニズムを限定し、上記照明システムは第2の走査メカニズムを更に含み、

上記照明システムは、任意の特定の時点に上記イメージ源上の、または上記マイクロレンズアレイ上の狭い帯域、または平行帯域のセットだけを照明するようになっており、

上記第2の走査メカニズムは、1つの照明帯域によって横切られる極めて短い時間間隔中だけ各マイクロスポットが照明されるように、上記第1の走査メカニズムと同期して上記イメージフィールドを横切る上記1つのまたは複数の照明帯域を繰り返して走査し、それによって上記印刷表面と上記マイクロレンズアレイとの間の相対運動に起因する上記印刷表面上の露光パターンのスミアリングを最小にするようになっている

請求項13に記載の印刷システム。

15. 上記イメージ源は光透過性の光学媒体を含み、上記照明システムは透過モードで上記イメージ源を照明し、上記イメージ源要素は上記光学媒体上に異なる光透過率特性を有するそれぞれのゾーンを含んでいる請求項13に記載の印刷システム。
16. 上記イメージ源は光反射性の光学媒体を含み、上記照明システムは反射モードで上記イメージ源を照明し、上記イメージ源要素は上記光学媒体上に異なる光反射率特性を有するそれぞれのゾーンを含んでいる請求項13に記載の印刷システム。
17. 上記イメージ源はデジタルマイクロミラーデバイス（DMD）を含み、上記投影システムは上記対物側上がテレセントリックである請求項16に記載の印刷システム。
18. 上記照明システムからの光を上記投影システムの光路内へ併合するように配置されているビームスプリッタを更に含み、このように併合された光及び上記イメージ源から反射したイメージ光は、上記ビームスプリッタと上記イメージ源との間で同一の光路を通るようになっている請求項16に記載の印刷システム。
19. 上記照明システムは、上記投影開口に隣接する離軸照明源を含んでいる請求項16に記載の印刷システム。
20. 上記照明源は、光ファイバ照明具からなる請求項19に記載の印刷システム。

21. 上記請求項8に記載のマイクロレンズアレイは、第1のマイクロレンズアレ

イを限定し、

上記イメージ源はデジタルマイクロミラーデバイス(DMD)、及び上記DMDに近接して配置されている第2のマイクロレンズアレイを更に含み、

上記各イメージ源要素は、上記第2のマイクロレンズアレイの対応する第1及び第2のマイクロレンズ及び上記DMDの対応するマイクロミラーからなり、

上記投影システムは上記対物側がテレセントリックであり、

上記第2のマイクロレンズアレイは、上記投影システムの対物面内に配置されており、

上記各イメージ源要素の対応する第1のマイクロレンズは、上記照明源を上記対応するマイクロミラーに近接する対応する第1の照明イメージ点に合焦させるようになっており、

上記各イメージ源要素の対応するマイクロミラーは、傾き制御及び固定光学倍率を有しており、上記マイクロミラーがその「オン」状態にある時には、

上記対応する第1の照明イメージ源点が、上記対応する第2のマイクロレンズの開口の中心にある対応する第2の照明イメージ点へ上記マイクロミラーによって再イメージされ、

上記対応する第1のマイクロレンズの開口が、上記マイクロミラーに近接する対応する開口イメージへ上記マイクロミラーによってイメージされるようになっており、

上記各イメージ源要素の対応する第2の照明イメージ点は、上記第1のマイクロレンズアレイの上記対応するマイクロレンズ開口上へ上記投影システムによって再イメージされ、

上記各イメージ源要素の対応する第2のマイクロレンズは、上記対応する開口イメージを上記投影開口上へイメージし、

上記各イメージ源要素の対応するマイクロミラーはその「オフ」状態にある時には傾いて、上記対応する第1のマイクロレンズによって捕捉された上記照明光を上記投影開口から逸らせるようになっており、

上記DMDマイクロミラー要素及び上記第2のマイクロレンズアレイ要素内の  
上記光学倍率、及び上記DMDと上記第2のマイクロレンズアレイとの間の

分離距離は、上記マイクロミラーの開口サイズ要求及び表面形状許容度、上記  
マイクロミラーの傾き範囲及び傾き許容度、エネルギー効率、及びイメージクロ  
ストークに関係するトレードオフを釣合わせるように選択されている請求項19  
に記載の印刷システム。

22. 上記請求項項8に記載の上記マイクロレンズアレイ、上記マイクロレンズ開  
口アレイ、及び上記焦点アレイは、それぞれ、第1のマイクロレンズアレイ、  
第1のマイクロレンズ開口アレイ、及び第1の焦点アレイを限定し、

上記イメージ源は、第2のマイクロレンズ開口アレイを限定するそれぞれの  
開口を有するマイクロレンズの第2の平面アレイを更に含み、

上記第2のマイクロレンズ開口アレイは、上記投影システムの対物面に位置  
決めされており、

上記第2のマイクロレンズアレイの上記マイクロレンズ要素は、上記投影開  
口と共に第2の焦点アレイを限定するそれぞれの焦点を有し、

上記各イメージ源要素は、上記第2のマイクロレンズアレイのそれぞれのマ  
イクロレンズ及び、上記それぞれのマイクロレンズの焦点に位置決めされている  
光変調要素を含んでいる

請求項8に記載の印刷システム。

23. 照明システム及び上記第2の焦点アレイに位置決めされている反射性表面を  
更に含み、

上記照明システムは、上記イメージ源を反射モードで照明し、

上記光変調要素は、上記第2の焦点アレイの上記焦点位置にある上記反射性  
表面上の可変反射率のスポットからなり、

上記第2のマイクロレンズアレイ及び投影システムは、上記照明システムか  
らの光を上記反射性スポット上へ合焦させるようにも構成されている  
請求項22に記載の印刷システム。

24. 上記反射性表面は、反射モードで動作するフォトマスクからなり、上記光変

調要素の反射率は、上記印刷表面を走査して異なる光反射率特性を有する上記フォトマスクを上記第2の焦点アレイの上記焦点に位置させるように、上記第2の焦点アレイを横切って上記フォトマスクを並進させることによって変化させられる請求項23に記載の印刷システム。

25. 上記投影システムは、二重テレセントリックである請求項8に記載の印刷システム。

26. 上記投影システムは、上記投影開口を上記投影システムの対物側の無限遠にイメージし、それによって上記システムを上記対物側でテレセントリックにする第1の平行化レンズ要素と、上記投影開口を上記投影システムのイメージ側の無限遠にイメージし、それによって上記システムを上記イメージ側でテレセントリックにする第1の平行化レンズ要素とを含む請求項25に記載の印刷システム。

27. 上記投影システムは、

第1及び第2の離軸部分を有する平行化鏡と、

上記投影開口内の反射器と、

を含み、

上記平行化鏡の上記第1の離軸部分は、上記投影開口を上記投影システムの上記対物側上の無限遠にイメージし、それによって上記システムを上記対物側でテレセントリックにし、

上記第1の離軸部分は、上記対物面からの光を上記投影開口に向けて反射させ、

上記投影開口内の上記反射器は、上記第1の離軸部分からの光を上記平行化鏡上の第2の離軸部分上へ戻すように反射させ、

上記第2の離軸部分は、上記投影開口からの光を上記イメージ面上に反射させ、

上記第2の離軸部分は、上記投影開口を上記イメージ側の無限遠にイメージし、それによって上記システムを上記イメージ側でテレセントリックにする請求項25に記載の印刷システム。

28. 光検出器及び位置フィードバック制御メカニズムを更に含み、

上記マイクロレンズアレイ及び投影システムは、上記イメージ源からの光を上記印刷表面上に合焦させるだけではなく、上記印刷表面から反射した光エネルギーからなる反射ビームを収集してそれを光検出器上に投影し、それによって

上記マイクロレンズアレイと上記印刷表面との間の位置的関係に関する情報を与える検出器信号を発生するようになっており、

上記位置的情報は、上記位置的関係を正確に制御するために上記フィードバック制御メカニズムによって使用されるようになっている

請求項8に記載の印刷システム。

29. 上記投影システムの光路からの反射光を分離するために配置されているビームスプリッタを更に含み、上記印刷表面に投影された光及び上記反射光は、上記ビームスプリッタと上記印刷表面との間で同一の光路を通るようになっている請求項28に記載の印刷システム。

30. 上記印刷表面は、2つの波長、または波長の狭いスペクトル範囲によって照明され、第1の波長は上記感光材料を露光し、第2の波長は上記検出器によって感知されて上記位置的情報を与えるようになっている請求項29に記載の印刷システム。

31. 上記投影システムは、二重テレセントリックである請求項30に記載の印刷システム。

32. 上記投影システムは、

第1及び第2の離軸部分を有する平行化鏡と、

上記投影開口内の反射器と、

を含み、

上記平行化鏡の上記第1の離軸部分は、上記投影開口を上記投影システムの上記対物側上の無限遠にイメージし、それによって上記システムを上記対物側でテレセントリックにし、

上記第1の離軸部分は、上記対物面からの上記第1の波長の光を上記投影開口に向けて反射させ、

上記投影開口内の上記反射器は、上記第1の離軸部分からの光を上記平行化鏡上のその第2の離軸部分上へ戻すように反射させ、

上記第2の離軸部分は、上記投影開口からの光を上記イメージ面上に反射させ、

上記第2の離軸部分は、上記投影開口を上記イメージ側の無限遠にイメージ

し、それによって上記システムを上記イメージ側でテレセントリックにする請求項30に記載の印刷システム。

33. 上記平行化鏡は第3の離軸部分を更に含み、

上記開口反射器は、透明ウェッジ基体上に沈積され上記第1の波長においては高い反射率を呈するが、上記第2の波長においては透明である第1の光学被膜からなり、

上記ビームスプリッタは、上記ウェッジ上の上記第1の被膜とは反対側の表面上に沈積されている第2の光学被膜からなり、

上記第2の被膜は、上記第2の波長において部分的に反射性であり、

上記第2の波長における照明エネルギーは、光源から上記両被膜を通して上記平行化鏡の上記第2の離軸部分に向けて投影されるので、両波長は上記ウェッジと上記印刷表面との間で同一の光路を通るようになり、

上記第2の波長において上記印刷表面から戻って反射したビームは、上記第2の被膜によって上記第3の離軸鏡部分へ向かって部分的に反射され、上記第3の離軸鏡部分へ向かって部分的に反射されるビームは上記2つの被膜の間の上記ウェッジの角度のために上記第1の離軸部分からは空間的に分離し、

次いで、上記第3の離軸鏡部分は、上記ビームを上記検出器上に反射させるようになっている請求項32に記載の印刷システム。

34. 上記印刷表面は位置合わせマスクを更に含み、上記位置合わせマスクは、上記位置フィードバック制御メカニズムによって検出され、上記マイクロレンズアレイと、上記マイクロレンズアレイと平行な上記印刷表面との横方向位置関係によって限定される位置関係の成分を決定するために使用され、

上記位置情報は、上記横方向位置関係を正確に制御し、且つ上記走査メカニ

ズムを上記イメージ源と同期させるために使用されるようになっている請求項28に記載の印刷システム。

35. 上記位置合わせマスク及び上記焦点アレイは周期パターンからなり、上記位置合わせマスクからの反射エネルギーが上記検出器信号においてモアレパターンを形成して上記マイクロレンズアレイと上記印刷表面との間の上記横方向位置関係の正確且つ精密な測度を与えるように、上記位置合わせマスクの周期性は

上記焦点アレイの周期性とは異なっている請求項34に記載の印刷システム。

36. 上記投影開口は、上記検出器信号が上記印刷表面に対する上記マイクロレンズアレイの合焦の高さの正確且つ精密な測度を与える合焦信号からなるように、上記マイクロレンズからの焦点が合っていない光を大きく減衰させ、上記合焦信号は、上記合焦の高さを正確に制御するために上記位置フィードバック制御メカニズムによって使用されるようになっている請求項28に記載の印刷システム。

37. 上記合焦の高さは上記印刷表面上の1つまたはそれ以上の位置において検出され、上記各位置における上記合焦の高さは、上記印刷表面上の平坦な領域上の近接する点上に合焦されてはいるが異なる焦点距離を有する2つまたはそれ以上のマイクロレンズからの反射エネルギー信号を比較することによって検出され、上記マイクロレンズからの差分検出器信号が上記合焦の高さの敏感な測度を与えるようになっている請求項36に記載の印刷システム。

38. 上記合焦の高さは上記印刷表面上の1つまたはそれ以上の位置において検出され、上記各位置における上記合焦の高さは、同一の焦点距離を有しているが上記印刷表面上の上記印刷表面上の1つまたは複数のステップを跨ぐ近接する点上に合焦されている2つまたはそれ以上のマイクロレンズからの反射エネルギー信号を比較することによって検出され、上記マイクロレンズからの差分検出器信号が上記合焦の高さの敏感な測度を与えるようになっている請求項36に記載の印刷システム。

39. 上記合焦ステップは上記印刷表面内の凹み付きの壁であり、上記印刷表面は上記合焦壁の外側の上面と、上記合焦壁の底にある底面とを含み、

上記感光材料は上記上面に沈積されており、

上記印刷表面は、2つの波長、または波長の狭いスペクトル範囲によって照明され、第1の波長は上記感光材料を露光し、第2の波長は上記検出器によって感知されて上記合焦信号を発生するようになっており、

上記合焦信号は印刷及び合焦感知の2つの目的に使用されるマイクロレンズ要素から入手されるが、上記第2の波長におけるそれらの焦点距離は色分散のために上記第1の波長におけるよりも長く、それによってマイクロレンズアレ

イは上記第1の波長を上記上面に合焦させるように、同時に上記第2の波長を上記上面と底面との間の焦平面上に合焦させるように位置決めし、良好な合焦信号分解能を達成することができるようになっている請求項38に記載の印刷システム。

40. 上記マイクロレンズアレイ及び上記マイクロレンズアレイに平行な上記印刷表面の横方向位置関係の小さいエラーを補正するために、上記投影開口面に平行な上記投影開口の横方向位置を連続的に調整する2軸位置変換器を更に含んでいる請求項8に記載の印刷システム。

41. 上記マイクロアレイの明澄な開口の外側の周辺付近に配置されている微小位置変換器を更に含み、上記変換器は制御された力分布を上記アレイに加えて合焦及び傾きエラーを修正し、上記印刷表面と上記マイクロレンズアレイとの間の反りまたは形状不整合を補償するようになっている請求項8に記載の印刷システム。

42. 上記マイクロレンズアレイに平行な上記マイクロレンズアレイの横方向並進及び回転位置を制御する微小位置変換器を更に含んでいる請求項41に記載の印刷システム。

43. 複製マイクロレンズアレイを製造する方法において、

先ず、マスタリング要素として使用される低NAマイクロレンズのアレイを形成するステップと、

上記マスタリング要素を、上記マスタリングマイクロレンズの焦平面に位置決めされている感光表面上に配置するステップと、

イメージ側がテレセントリックである投影システムによって、均一に照明されたイメージフィールドを上記マスタリング要素上に投影するステップと、を含み、

上記投影システムの開口ストップは、各マスタリングマイクロレンズによって上記感光表面上にイメージされてその上に関連する潜露光像を形成する透明マスクを含んでおり、

上記表面が露光される時に、上記マスタリング要素及び上記感光表面の相対位置を固定したままそれらと一緒にして上記イメージフィールドを横切って走

査させるステップと、

上記感光表面内の上記潜露光像をマイクロレンズアレイ内に現像するステップと、

を更に含み、

それによって複製マイクロレンズアレイを形成してその開口レイアウトを上記マスタリング要素の開口レイアウトに整合させ、上記複製マイクロレンズが上記開口マスクの透過率プロファイルによって決定される同一光学合焦特性を有するようにしたことを特徴とする方法。

44. 上記マスタリング要素は、上記マスタリングマイクロレンズ位置が、正確に平行化され且つ露光領域全体に均一な交差レーザビーム間の1つまたは複数の干渉パターンによって限定されるようなフォトリトグラフィックプロセスによって形成され、それによって上記マイクロレンズの極めて高い位置配置精度及び高い均一性が達成されるようになっている請求項43に記載の方法。
45. 上記マスタリングマイクロレンズアレイは、レーザ支援化学エッチングのプロセスによって、溶融シリカ内の表面レリーフプロファイルとして形成されている請求項43に記載の方法。
46. 上記複製マイクロレーザアレイは、レーザ支援化学エッチングのプロセスによって、溶融シリカ内の表面レリーフプロファイルとして形成されている請求項43に記載の方法。

### 【発明の詳細な説明】

#### マイクロリトグラフィ用マイクロレンズ

#### スキャナ及び広フィールド共焦点顕微鏡

##### 発明の背景

本発明は、広義に「イメージ読出し」及び「イメージ書き込み」として類別することができる2つの分野に関する。イメージ読出し分野において本発明が意図する主応用は、タンデム走査型共焦点（コンフォーカル）顕微鏡としてであるが、例えば高分解能文書スキャナ、または光学式大容量記憶媒体等のような他の応用に潜在的に使用することも可能である。イメージ書き込みにおいて本発明が意図する主応用は、半導体製造用のマイクロリトグラフィプリンタとしてであるが、この分野は文書印刷、写真式複写等のような応用を含むこともできる。以下に主として共焦点顕微鏡及びマイクロリトグラフィ応用に関連して本発明を説明するが、本明細書を拡張して他の応用にも同様に適用できることは明白である。

共焦点顕微鏡（参照文献1）は、照明が、サンプル上の回折制限されたマイクロスポットに合焦された小さいピンホールによって濾波されること、及び（反射共焦点顕微鏡の場合には）サンプルから反射した光が再び同一ピンホールによって濾波されることを除いて、普通の顕微鏡と類似している。合焦されたビームは、サンプルを横切ってラスター走査され（ピンホールまたはサンプルの何れかを走査することによって）、サンプルの高分解能ラスタイメージが構築される。（透過型共焦点顕微鏡は、照明及び透過光を濾波するために別々のピンホールを使用することを除いて、類似している。）普通の顕微鏡と比較した場合、共焦点顕微鏡は横向方向イメージ分解能が優れており、また極めて精細な深さ分解能を呈する。

Nipkow型のタンデム走査型共焦点顕微鏡（参照文献1の14章）は、極めて高いイメージフレームレートを達成するために、単一のピンホールではなく、ピンホールのアレイを使用する。これらのピンホールは、実時間イメージングを得るために、高速でスピンドル上に形成されている。Nipkow型システムの欠点は、フィールドサイズが普通の顕微鏡の対物レンズの性能によって制限されることである。Nipkow型システムは、市販の高倍率の対物レンズのフィールド限界が

与えられると、例えば完全半導体ウェーハを走査するためには、たとえその高イメージフレームレートを用いたとしても極めて長い時間を必要とする。

典型的な顕微鏡と比較すると、マイクロリトグラフィステッパーに要求されるフィールドサイズは要望を遥かに越える。現在のステッパーは、高品質顕微鏡対物レンズに匹敵する高分解能、平坦なフィールド、及び低ひずみイメージング性能を達成しなければならないが、フィールドサイズは約20mmまたはそれ以上である。このレベルの性能は、Perkin-Elmer Micralign and Wynne-Dysonシステム（参照文献2の8章）のようなマッシブな多重要素の全硝子投影レンズまたは反屈折(cataadioptric)システムを使用することによって得られる。分解能、合焦、及びオーバレイ精度を維持するためには、これらのシステムにおける光学系はサブミクロンの精度で製造しなければならず、マッシブな光学成分及び機械成分間の大きい距離にわたってサブミクロンの位置合わせ及び寸法安定度の許容度を保持しなければならない。イメージの分解能を高くし、フィールドサイズを大きくするという組合わせ要求に伴う技術的な困難さは、半導体応用のための光学式マイクロリトグラフィを更に前進させるために重大な課題を与える。

#### 発明の概要

本発明は、普通の広フィールド、高開口数(numerical aperture: N A)顕微鏡及びマイクロリトグラフィシステムの複雑さ及び価格の主たる源であるイメージ分解能とフィールドサイズとの間のトレードオフを回避するイメージングシステム及び技術を提供する。

要約すれば、これは、開口数は極めて小さいがイメージフィールドは大きい比較的低分解能のイメージ投影システムと、各々が大きい開口数と極めて小さいフィールドとを有している小型レンズ要素とを組合わせて使用することによって達成される。投影システムは小さい開口ストップを含み、これはマイクロレンズによって顕微鏡サンプル上の回折制限されたマイクロスポットのアレイ上に、またはマイクロレンズ焦点位置の印刷表面にイメージされ、この表面が走査されて焦点アレイから完全なラスタイメージが構築される。

システムの臨界的な寸法及び位置合わせの許容度は、マイクロレンズアレイ自

体内と、サンプルまたは印刷表面に対するその位置決めとに局部化される。これにより、普通のマイクロイメージングシステムにおいては問題となる寸法公差の積み重ね、熱効果、及び重量負荷に対するシステムの感受性が最小になる。マイクロリトグラフィ応用の場合には、マイクロレンズアレイは、印刷表面に対するアレイの位置合わせを制御する位置エンコーダのイメージング要素として機能させることもできる。露光イメージング光学系及び位置エンコーダ光学系を1つにし、そして同一にすることによって、位置決めサーボ機構における寸法公差の積み重ねは最小に維持される。マイクロレンズ位置決めサーボは、X-Y位置決め、合焦、及び傾きを正確且つ精密に制御することができ、一実施形態では、印刷表面またはレンズアレイ自体の何れかにおけるゆがみを補償することもできる。本発明の本質及び長所は、以下の添付図面に基づく説明から更に理解することができよう。

#### 図面の簡単な説明

図1は、タンデム走査型共焦点顕微鏡として動作することができる本発明の簡単な実施形態を示す図である。

図2は、リトグラフィプリンタとして機能することができる極めて類似した実施形態を示す図である。

図3は、印刷及び顕微鏡式イメージング機能を单一のデバイスに組合せたりトグラフィシステムの変形を示す図である。

図4-6は、使用可能な幾つかの代替走査パターン(双方向ラスタ走査(図4)、連続線走査(図5)、及びセグメント化線走査、即ち「多重走査」(図6)を含む)を示す図である。

図7は、焦平面フィールド座標(X,Y)、及び開口平面座標(X',Y')を示す図である。

図8は、マイクロレンズ点、線、及び面露光プロファイルを示す図である。

図9は、イメージ特色及びその相補の露光プロファイル(E対X)を示す図である。

図10は、幾つかの正の線イメージの定露光輪郭を示す図である。

図11a-fは、論理積（論理AND）及び論理和（論理OR）の論理演算を遂行する多重レベル処理手順を示す図である。

図12及び13は、プール合成の簡易説明図である。

図14は、開口サイジング及びマイクロレンズ間隔に関する基本的設計トレードオフを示す図である。

図15は、マイクロレンズ設計の考え得る構成を示す図である。

図16a-gは、レーザ支援化学エッチングに基づく製造プロセスを示す図である。

図17は、マイクロレンズ複製の露光プロセスを示す図である。

図18は、照明光学系を簡易化する代替設計構成を示す図である。

図19は、より簡単な照明システムを示す図である。

図20は、2つのコリメータレンズを単一の平行化ミラーに置換した図19の構成の変形を示す図である。

図21a、bは、ウェーハの位置合わせ及び合焦を監視する位置エンコーダとして使用される共焦点ピューリングシステムを含むことを除いて、図20に類似する構成を示す図である。

図22は、対物・面マイクロレンズアレイをマイクロミラー・アレイと共に使用する設計構成を示す図である。

図23は、フォトマスクを対物・面マイクロレンズアレイと共に使用する代替実施形態を示す図である。

図24及び25は、走査型の照明技術を示す図である。

図26は、X追尾のためのモアレ技術を示す図である。

図27は、モアレ技術を用いて補間された検出器信号を示す図である。

図28は、異なる合焦高さ $h_1$ 、 $h_2$ 、及び $h_3$ を有する3つの散在するマイクロレンズセットを示す図である。

図29は、X、Y、及び $\theta$ 回転を追尾するのに使用できるパターンの平面（ウェーハ面を上から見下ろした）図である。

図30は、波長 $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$ で動作する0.5NAシステムの共焦点応答を示す

図である。

図31は、焦平面がウェーハ表面の上下に距離 $\Delta Z$ だけ変位している2つの合焦センサマイクロレンズを示す図である。

図32は、合焦センサマイクロレンズがウェーハ表面の下へ小さい距離 $\Delta Z$ だけ変位した共通焦平面を有するように設計され、ウェーハ表面の部分（例えば、スライブライン内の領域）が $2\Delta Z$ の深さにエッチングされるようになっている構成を示す図である。

図33は、波長 $\lambda = 0.633 \mu m$ で動作する0.5NAシステムを使用し、 $\Delta Z = 0.5 \mu m$ の場合の合焦フィードバック信号 $F[z]$ を示す図である。

図34は、散在させた $z$ センサを有するマイクロレンズのレイアウトを示す図である。

図35a、bは、マイクロレンズアレイの6軸マイクロ位置決め制御+ゆがみ補償を行うシステムの上面図及び側断面図である。

図36は、種々のフィードバック及び制御メカニズムを要約したシステムレベル概要図である。

#### 実施形態の説明

##### 動作の基本原理

図1は、タンデム走査型共焦点顕微鏡として動作することができる本発明の簡単な実施形態を示している。このシステムは、低分解能、二重テレセントリック(telecentric)光投影システム1を含み、この光投影システム1はマイクロレンズアレイ2を光検出器アレイ3上にイメージし、各マイクロレンズ要素は対応する感光検出器要素上にイメージされる（例えば、マイクロレンズ4は検出器要素5上にイメージされる）。個々の各マイクロレンズは、サンプル表面6における、またはその付近の対応する焦点を、投影システムの開口ストップ7上にイメージするので、対応する検出器要素はマイクロレンズの焦点における小さいマイクロスポット全体の反射率を感知する（例えば、マイクロレンズ4は点8を投影開口7上にイメージするので、要素5が点8における反射率を感知する）。サンプルは、照明システム9から反射モードで照明される。マイクロスポットは、照

明をビームスプリッタ10を使用して光路内に合流させ、投影開口7及びマイクロレンズアレイ2を通過させることによって、選択的に照明される。

マイクロレンズを通る投影開口の回折制限されたイメージがマイクロスポットを限定し、これらのマイクロスポットの大きさはマイクロレンズの開口寸法よりも少なくとも1桁は小さい。マイクロスポットのサイズは、マイクロレンズの回折点広げ機能に匹敵することが好ましい。従って、好ましい実施形態では、投影開口は共焦点顕微鏡におけるピンホールと同一の機能を遂行する。このシステムと従来技術のタンデム走査型共焦点顕微鏡との間の1つの相違は、単一の対物レンズを通してピンホールのアレイをイメージするのではなく、このシステムは単一の「ピンホール」（即ち、投影開口）を使用し、「対物レンズ」（マイクロレンズ）のアレイを通してイメージすることである。

図2に示す実施形態は、図1の顕微鏡システムに極めて類似しているが、リトグラフィプリンタとして機能できるようになっている。（図2並びに以後の図面では、図1に示した要素に対応する要素に対しては同一の番号を付してある。）このシステムも低解像力、二重テレセントリック投影システム1を含んでいるが、この実施形態では、投影システムはイメージ源11をマイクロレンズアレイ2上に合焦させるように機能する。イメージ源は、光変調源要素（例えば、可変反射率のスポットまたはパッド）のアレイからなり、各源要素は対応するマイクロレンズ要素上にイメージされる。イメージ源は「デジタル・マイクロミラー・デバイス」（即ちDMD、参照文献3）ができることがあり、各源要素は個々のマイクロミラー画素素子からなる。各マイクロレンズは、投影開口7を印刷表面12上の対応するマイクロスポット上にイメージし、各源要素は対応するマイクロスポット上の露光レベルを制御する。イメージ源11は、照明システム9からの照明をビームスプリッタ13を使用して光路内に合流させることによって反射モードで照明される。

このシステムは、Hugleらのマイクロレンズフォトリトグラフィ発明（参照文型4、5）とは2、3の点で異なっている。Hugleのシステムは、マイクロレンズアレイ全体のために単一の投影開口を使用（図2に示すように）しておらず、別々の平行光路を有するマイクロレンズユニットのアレイを備えている。また、

Hugleのマイクロレンズは非走査型、広フィールドイメージングデバイスであり、各々はマイクロレンズ開口寸法に匹敵するサイズのイメージフィールドをカバーする。これに対して本発明は、瞬時イメージフィールド（即ち、マイクロスポット）の大きさがマイクロレンズ開口より少なくとも1桁は小さいマイクロレンズを用いて全フィールドカバレッジを達成するために走査技術を使用する。（共焦点顕微鏡例の場合のように、リトグラフィシステムのマイクロスポットはマイクロレンズを通る投影開口の回折制限されたイメージによって限定され、サイズはマイクロレンズの回折点広げ機能に匹敵することが好ましい。）

図3は、印刷及び顕微鏡イメージング機能を単一のデバイスに組合せたりトグラフィシステムの変形である。この実施形態は、図2のシステムに類似しているが、印刷表面12から反射した光が、ビームスプリッタ13によって光路にスプリットされ、光検出器アレイ14上に導かれる。（典型的なシステムは、露光にUV波長を、イメージングにHeNeレーザ波長をのように2つの波長を使用する。）検出器は、印刷表面上の位置合わせマークを感知することができ、共焦点イメージングの正確な深さ弁別を利用して表面を横切る合焦の高さの変動を感じ取ることができる。閉ループサーボメカニズムは、位置情報を使用してレジストレーション位置合わせ及び／または合焦及び傾きを制御する。またサーボメカニズムは、アレイの周辺の付近に補償応力分布を印加することによって、印刷表面またはマイクロレンズアレイの何れかのゆがみひずみを補償することもできる。

上述した各実施形態では、マイクロレンズの焦点アレイが完全ラスタイメージを追尾するように、サンプルまたは印刷表面が走査される。（代替として、マイクロレンズシステム自体を、固定されたサンプルまたは印刷表面に対して走査することができる。）

図4-6は、使用することができる幾つかの代替走査パターンを示しており、双方向ラスタ走査（図4）、連続線走査（図5）、及びセグメント化走査、即ち「多重走査」（図6）を含んでいる。双方向ラスタ走査（図4）では、イメージ表面は方形または矩形セルのアレイに分割される。各セルの寸法はマイクロレンズの中心間隔と一致し、表面は、各焦点15が单一のセル16をカバーするラスタ線のパターンで走査するように、双方向に走査される。連続線走査（図5）

では、各焦点17はイメージフィールド全体を横切って伸びる間に1つのラスタ線18を走査する。マイクロレンズは、走査方向19に対して小さい角度 $\delta$ だけ傾斜した行内に配列されているので、焦点は極めて近づいた（密に離間した）ラスタ線のパターン（即ち、ラスタ線周期 $d_r$ がマイクロレンズ中心間間隔 $d_0$ よりも遙かに小さく、 $d_r = d_0 \sin \delta$ になる）を辿る。セグメント化線走査（図6）は、各ラスタ線が異なる線焦点（例えば、22及び23）によって走査される複数のセグメント（例えば、20及び21）に分割されることを除いて類似している。

「多重走査」イメージングモードは、走査セグメントが重なり合っており、各ラスタ線が1回以上走査されることを除いて、セグメント化走査（図6）に類似している。多重走査イメージングは、種々の用途を有している。1つの応用は、連続する走査間の照明色度を変化させることによってカラーイメージまたはプリントを作成することである。（例えば、図6の線セグメント20は先ずレンズ焦点22によって走査され、次いで異なる照明を用いて焦点23によって再度走査される。）顕微鏡システムは、走査方向に対してマイクロレンズアレイを傾け、連続するイメージ走査を僅かに異なる合焦の深さで行うことによって、三次元イメージを作成するために多重走査イメージングを使用することもできる。（代替として、マイクロレンズアレイを傾けるのではなく、焦平面（フォーカルレーン）の高さの分布がアレイになるように設計することができる。）リトグラフィシステムにおいては、露光線量を制御するために連続走査間で照明輝度を変化させることができる。（もしイメージ源がグレーレベル制御を行わないのであれば、これは有用である。各々が異なる照明レベルにあるN走査を用いた場合、可能な露出線量レベルの合計数は $2^N$ である。）代替として、リトグラフィシステムは、マイクロレンズ欠陥のような諸要因による統計的イメージングエラーを最小にするだけのために、冗長走査を使用することができる。

以下に、マイクロレンズスキャナ設計の原理、成分、及びサブシステムの詳細を、主としてマイクロリトグラフィ及び半導体ウェーハ生産に関連して説明する（しかしながら、明細書の大部分を、顕微鏡及び他の応用に直接適用することができる）。マイクロリトグラフィシステムの実際の実施形態は、4倍周波数266

$\text{nm}$  の Nd : YAG レーザ (参照文献 6) 、及び約 2,000,000 画素で説明されているプロトタイプデバイス (参照文献 3) に類似の DMD イメージ源のような連続深 UV レーザ光源を使用することができる。DMD は、10 kHz 以上のフレームレートで動作することが可能であり、それにより  $2 \times 10^1$  画素/秒の画素レートが得られる。ラスタ線周期が約 0.1 ミクロンであるものとすれば、露光面積レートは  $2 \text{ cm}^2/\text{秒}$  になる。システムは、反屈折投影光学系を使用することができる。この反屈折投影光学系が簡単で、小型の設計であるために、複数のマイクロレンズユニットを 1 つのマシン内に組合わせることができ、それにより合計スループットは  $10 \text{ cm}^2/\text{秒}$  程度になる。

#### マイクロレンズイメージング理論及び技術

マイクロレンズアレイの基本的イメージング特性は、フーリエオブティックスの方法を使用して導出することができる。(これは、開口数が小さく、光収差は重大ではないものとしているが、それにも拘わらず、これらの方法は約 0.5 以下の開口数を有するマイクロレンズの特性の有用な第 1 近似を与える。)

$(X, Y)$  をマイクロレンズの焦平面フィールド座標とし、 $(X', Y')$  をその開口面座標とする(図 7)。無次元フィールド座標  $(x, y)$  及び開口座標  $(x', y')$  を導入することによって解析が簡易化される。

$$x = X/\lambda, \quad y = Y/\lambda \quad \text{式 1}$$

$$x' = -X'/F_m, \quad y' = -Y'/F_m \quad \text{式 2}$$

但し、 $\lambda$  は露光波長であり、 $F_m$  はマイクロレンズの焦点距離である(図 7)。焦平面上の(スカラー)電界振幅分布を  $A[x, y]$  とし、マイクロレンズ開口面上の電界分布を  $A'[x', y']$  とする。(注: 本明細書では、大括弧 “[…]” は関数引数区切り記号として使用され、小括弧 “(…)” はグループ化に使用される。) 重要ではない位相ファクタを無視すれば、 $A$  及び  $A'$  は、フーリエ変換関係によつて近似的に関係付けられる。

$$A'[x', y'] = \iint A[x, y] \exp[i2\pi(x'x + y'y)] dx dy \quad \text{式 3}$$

$$A[x, y] = \iint A'[x', y'] \exp[-i2\pi(x'x + y'y)] dx' dy' \quad \text{式 4}$$

(電界時間分離ファクタを  $\exp[+i\omega t]$  とし、全ての整数が  $-\infty$  から  $\infty$  までとしている。) 焦平面において発生する瞬時エネルギー分布は  $|A[x, y]|^2$  に比

例する。（これは隣接するマイクロレンズからの分布間に重大な重なりが存在していないものとしているが、マイクロレンズの中心間隔の大きさが典型的には回折制限されたスポットのサイズより1桁以上大きいので、これは安全な仮定である。）もしスポットがパルス化された光源（エキシマレーザのように）を使用して「フラッシュ露光」されるのであれば、全走査を完了した後の合計露光線量  $E[x,y]$  は、格子パターン上に展開された回折制限され、重なり合ったマイクロスポット分布の結合力のない（インコヒーレントな）重畠である。

$$E[x,y] = \sum_{j,k} g_{jk} |A[x - js, y - ks]|^2 \quad \text{式5}$$

但し、 $s$  は格子サイズ（波長の単位での）であり、 $g_{jk}$  は点  $(x,y) = (js, ks)$  における露光グレーレベル（0乃至1のスケールで）である。もし連続光源を使用すれば、各スポットが露光されている間のウェーハの運動に起因して、マイクロスポットにあるスミアリングが生ずるようになるが、ここではこの「点スミアリング」効果は無視する。イメージは、典型的には、ラスター線周期  $d_r$ （図5）、またはその倍数に等しい格子サイズ  $s$  を使用して露光され、波長

$$s = m d_r / \lambda \quad \text{式6}$$

（但し、 $m$  は整数）に正規化される。

マイクロレンズイメージングにおいては、3つの露光分布、即ち、点  $(x,y) = (0,0)$  が単位グレーレベルで露光され、他の全ての点が露光されない場合に得られる点分布  $E_{point}[x,y]$ 、線  $x=0$  上の全ての格子点が単位グレーレベルで露光され、他の全てが露光されない場合に得られる線分布  $E_{line}[x,y]$ 、全ての格子点が単位グレーレベルで露光される場合に得られる面分布  $E_{plane}[x,y]$  が主として重要である。

$$E_{point}[x,y] = |A[x,y]|^2 \quad \text{式7}$$

$$E_{line}[x,y] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} |A[x, y - ks]|^2 \quad \text{式8}$$

$$E_{plane}[x,y] = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} |A[x - js, y - ks]|^2 \quad \text{式9}$$

フーリエオプティックスからの基礎的な結果は、もし格子サイズが限界

$$s < 1/(2NA_m) \quad \text{式10}$$

以内にあれば（但し、 $NA_m$ 、はマイクロレンズの開口数）、 $E_{plane}[x,y]$  はある定数に縮小され、 $E_{line}[x,y]$  は $x$ において均一な断面を有するようになる（即ち、それは $y$ 依存性を呈さなくなる）。

$$E_{plane} = (\iint |A[x,y]|^2 dx dy)/s^2 \quad \text{式11}$$

$$E_{line}[x] = (\int |A[x,y]|^2 dy)/s \quad \text{式12}$$

（それぞれ「面露光理論」及び「線露光理論」と呼ぶこれらの結果に関しては後述する。正のレジストを用いると $E_{plane}$ 分布が全てのレジストを分解させ、 $E_{line}$ が分離した線形空間を創出し、そして $E_{plane}$ が分離したホールを創出することに注目されたい。）式11及び12は、フィールド積分の代わりに、開口積分で表すことができる。

$$E_{plane} = (\iint |A'[x',y']|^2 dx' dy')/s^2 \quad \text{式13}$$

$$E_{line}[x] = (\int |\int A'[x',y'] \exp[-i2\pi xx'] dx'|^2 dy')/s \quad \text{式14}$$

均一に照明された円形開口の特別な場合には、開口関数 $A'$ は、

$$A'[x',y'] = \begin{cases} \sqrt{x'^2 + y'^2} < NA_m; \text{ の場合 } A_0 \\ \text{それ以外の場合 } 0 \end{cases} \quad \text{式15}$$

但し、 $A_0$ は定数である。この逆フーリエ変換 $A$ は、

$$A[x,y] = A'_0 NA_m J_1[2\pi NA_m \sqrt{x^2 + y^2}] / \sqrt{x^2 + y^2} \quad \text{式16}$$

の形状を有する。但し、 $J_1$ は第1種のベッセル関数である。（式16は、古典

的な「空気」の回折パターンを表している。）式15及び16に、式7、13、及び14を代入すると、

$$E_{point}[x,y] = E_{plane} s^2 J_1[2\pi NA_m \sqrt{x^2 + y^2}]^2 / (\pi(x^2 + y^2)) \quad \text{式17}$$

$$E_{line}[x] = E_{plane} (s/(NA_m \pi^3 x^2)) (1 - {}_1F_2[1; 1/2, 3/2; -(2\pi NA_m x)^2]) \quad \text{式18}$$

が求められる。但し、 ${}_1F_2$ は一般化した超幾何関数である。これらの分布のピーク値は、

$$E_{point}[0, 0] = E_{plane} s^2 NA_m^2 \pi \quad \text{式19}$$

$$E_{line}[0] = E_{plane} s 16 NA_m / (3\pi) \quad \text{式20}$$

である。式10から、 $E_{point}[0, 0]$ 及び $E_{line}[0]$ 上の以下の最大限度が求められる。

$$E_{point}[0, 0] < E_{plane} \pi/4 \quad \text{式21}$$

$$E_{line}[0] < E_{plane} 8/(3\pi) \quad \text{式22}$$

図8は、 $NA_m = 0.5$ 、及び $s=1$ の場合の点、線、及び面露光プロファイルを示している。（より小さいステップサイズの場合には、 $E_{point}/E_{plane}$ スケールは $s^2$ に比例し、 $E_{line}/E_{plane}$ スケールは $s$ に比例する。）

面露光理論は、マイクロレンズアレイスキーナの有用イメージング反転特性を暗示している。もしレジスト溶解度しきい値 $E_c$ が $E_{plane}/2$ にあるように照明レベルを設定すれば、単にイメージグレーレベルを反転させる（即ち、各露光点において $g_{jk} \rightarrow 1 - g_{jk}$ にする）だけで、イメージ反転を達成することができる。例えば図9は、イメージ特色及びその相補の露光プロファイル（E対X）を示している。この特色はグレーレベル分布 $g_{jk}$ によって発生された露光プロファイル $E_c$ を有している。

$$E_c[x, y] = \sum_{j,k} g_{jk} |A[x - js, y - ks]|^2 \quad \text{式23}$$

イメージ反転の下では、露光分布 $E_c$ は分布 $E_c = E_{plane} - E_c$ に変換される

（式9から）。

$$E_b[x, y] = \sum_{j,k} (1 - g_{jk}) |A[x - j s, y - k s]|^2 = E_{plane} - E_a[x, y] \quad \text{式24}$$

2つの露光プロファイルは同一点において可溶性しきい値 $E_s$ を横切り ( $E_s = E_{plane} - E_a$ であるから)、従ってこれらは同一幅寸法Wに現像される。(もしイメージ源がグレーレベル制御を与えれば、どの所望露光輪郭もが $E_s$ にあるように正及び負のイメージのグレーレベルを独立的にスケールすることはできないので、イメージ反転プロセスは可溶度しきい値 $E_s$ が $E_{plane}/2$ にあることを要求しない。)

高露光面積を取り囲む閉じた輪郭からなるイメージ特色を「正」と呼ぶことができ、一方相補特色（低露光領域を取り囲む閉じた輪郭）を「負」と呼ぶことができる。図10は、 $N.A. = 0.5$ で構成された可変長の幾つかの正の線イメージに対して $0.25 E_{plane}$ 、 $0.75 E_{plane}$ の定露光輪郭を示している。（正のレジストを使用すると、これらのパルスは線形空間内に現像される。）“+”マークで示されている露光点は全て単位グレーレベルで露光され、X方向には $1.5\lambda$ だけ、及びY方向には $\lambda$ だけ分離されている。一般に線及び面露光理論は、無限大の線及び面にのみ適用されるが、図10に示すような短い線形または方形特色は、かなり直線状の輪郭及び均一な断面を用いて形成することができる。直線性及び均一性は、グレーレベル輪郭及び小さい格子ステップ（例えば、 $s=0.5$ ）を使用することによって改善することができる。

図10に示すような簡単なイメージパターンを組合わせ、「プール合成」演算を使用することによって小さい、鋭くディテールされたパターンを作成することができる。最も簡単なこのようないmage反転（即ち、プール否定）であり、これは上述したようにグレーレベル反転によって遂行することができる。論理積（論理AND）及び論理和（論理OR）のような他の論理演算は、図11a-fに示すような多重レベル処理手順によって遂行することができる。図11aにおいては、ウェーハ基体24は厚いPMMA層25、平面化されたスピノン・オン・硝子（SOG）層26、及び薄いレジスト層27を用いてスピノン被膜されて

いる。トップレジスト層27が露光され、現像されてSOGのエッチングされたパターンが作られる。図11bにおいて、トップレジストが除去され、第2のP

MMA層28、SOG層29、及び薄いレジスト30が沈積され、トップレジストが露光され、現像されてトップSOG層内に第2のエッチングされたパターンが作られる。図11cにおいて、二重層PMMA構造は基体まで反応性イオンエッチングされ、2つのSOG層上のエッチングされた領域の論理積によって定義された領域を基体上に露出させたエッチマスクが得られる。

上述したプリンタの変形においては、トップPMMAは底SOG層を露出させるのに充分なところまでエッチングされるだけである（図11d）。これに続いて選択性エッチングが遂行され、トップSOG層が除去されて下側SOG層の一部が露出される（図11e）。最後に残されたPMMAが基体までエッチングされる（図11f）。このプロセスにより、2つのSOGエッチパターンの論理和によって定義されたエッチマスクがもたらされる。

図12及び13は、プール合成の簡単な説明図である。図12においては、2つの正の線パターンの論理和合成（反対のハッチングによって示す）によって小さい方形の島のアレイが作られる。図13においては、2つの平行な、重なり合った正の線パターンのセットが論理積的に合成されて、狭い間隔が形成されている。これらのパターンの複数のセットを交互配置すれば、極めて小さい特色の高密度アレイ（特色密度が古典的な回折限界を超える）を形成することができる。

（特色のサイズ及び密度は主としてレジストコントラスト及びオーバレイ精度によって制限される。）

#### 開口設計

開口のサイジングとマイクロレンズ間隔とに関する基本的な設計のトレードオフを、図14に図解してある。各マイクロレンズ31は、ウェーハ表面12上の、厳密に拘束された振幅分布A[X,Y]を有する回折制限された焦点にビームを合焦させる。この分布は、マイクロレンズの開口数によって、及びマイクロレンズ開口32上の振幅分布A'[X',Y']によって決定される。ウェーハ面上の合焦分解能を最適化し、また源要素とマイクロレンズ開口との間の光学的レジストレーションエラーに対する焦点の感性を最小にするために、マイクロレンズ31に対

応する源要素33からの回折制限されたイメージである後者の分布を、好ましく

は開口32をオーバーフィルさせるべきである。しかしながら、もしA'分布が広過ぎると（または、もしマイクロレンズが接近し過ぎると）それは隣接するマイクロレンズ開口34及び35にも重なり、隣接する開口間にイメージのクロストークをもたらす。

A'分布は、投影システムの開口数によって、及び投影開口7上の振幅分布A''[X'',Y'']によって決定される。（A''は、源要素33だけから到来する開口照明の部分を表す。合計開口照明フィールドは、他の全ての源要素からの同じような分布をも含んでいる。）源要素の開口サイズは、A''分布を最適に制御するよう選択することができる。もし源要素が、それらの中心間隔よりも遙かに小さければ、要素33の開口における回折によってA''分布は投影開口7上に極めて均一に広げられ、非均一な開口照明により投影されるイメージ面分布A'の可能な広がり、またはひずみを最小にする。また、照明源の位置合わせの不良（ミスアラインメント）に対する感受性は、源要素を小さくすることによって最小にすることができる。しかしながら、トレードオフは、投影開口のオーバーフィリングによって源要素の開口に比例して光学的効率が低下することである。

投影開口のサイズ及び形状は、マイクロレンズ開口32にまたがる照明の均一性と、隣接する開口34及び35内への光漏洩の最小化との間のトレードオフを最適化するように設計することができる。1つのアプローチは、マイクロレンズ格子に位置合わせされた方形開口7の使用であることができる。方形開口振幅伝達関数t<sub>p</sub>[X'',Y'']は、

$$t_p[X'', Y''] = \begin{cases} |X''| < W_p/2 \text{ 及び } |Y''| < W_p/2 \text{ の場合} & 1 \\ \text{それ以外の場合} & 0 \end{cases} \quad \text{式25}$$

ここに、W<sub>p</sub>は投影開口幅である。A''分布が投影開口内で実質的に均一であるものとすれば、方形開口によてもたらされるマイクロレンズ開口分布A'は、ほぼ次の関数によって表される。

$$A'[X', Y'] = A_0' \operatorname{sinc}[W_p X' / (\lambda F_p)] \operatorname{sinc}[W_p Y' / (\lambda F_p)] \quad \text{式26}$$

但し、 $A_0'$ は定数であり、 $F_p$ は投影開口7とマイクロレンズ開口32との間の

光学サブシステムの焦点距離であり、 $\lambda$ は露光波長であり、そして  $\text{sinc}[u]$  は  $\sin[\pi u]/(\pi u)$  である。開口幅  $W_p$  は、  $\text{sinc}$  関数の第1ノードが隣接するマイクロレンズ開口34及び35上にほぼ心合わせされるように選択することができる。

$$W_p = \lambda F_p / d_m \quad \text{式27}$$

ここに、  $d_m$  はマイクロレンズの中心間隔である。この場合、式25及び式26は、

$$t_p [X', Y'] = \begin{cases} |X'| < \lambda F_p / (2 d_m) \text{ 及び} \\ |Y'| < \lambda F_p / (2 d_m) \text{ の場合} & 1 \\ \text{それ以外の場合} & 0 \end{cases} \quad \text{式28}$$

$$A' [X', Y'] = A_0' \text{sinc}[X'/d_m] \text{sinc}[Y'/d_m] \quad \text{式29}$$

になる。例えば、もし  $d_m$  がマイクロレンズ開口幅  $a_m$  (図14) の4倍であれば、開口32の照明強度の均一性は約5%にしか過ぎず (ウェーハ面上に重要な合焦分解能を与えるには充分ではない)、各隣接する開口34または35内へのエネルギー漏洩は、マイクロレンズ開口を円形として、約0.4%になる。

クロストーク振幅成分が、重大なコヒーレント効果を生じさせることはない。例えば、マイクロレンズ開口32全体の主振幅分布  $A' [X', Y']$  が、隣接する源要素34及び35からのクロストーク分布  $A' [X' + d_m, Y']$  及び  $A' [X' - d_m, Y']$  と重畠される。各クロストーク分布は開口32にわたって  $X'$  内でほぼ奇対称であり、一方  $A' [X', Y']$  は偶対称である。これは (フーリエ変換の特性に基づいて)、ウェーハ面において、クロストーク振幅がほぼ純粋な複素になり、一方  $A[X, Y]$  は実数値となるので、コヒーレンス相互作用が最小になることを暗示している。これは、照明がコヒーレントであること、及び源要素がコヒーレントに整列しているものとしている。(もし隣接する要素間に重大な位相シフトが存在すれば、クロストークエネルギー漏洩は、コヒーレンス相互作用のために上述したレベル、即ち 0.4% よりも遙かに高くなる可能性がある。)

クロストーク抑圧を更に良好にするような、上述した方形開口の変形が存在す

る。1つの代替は、開口をマイクロレンズ格子に対して $45^\circ$ の角度で整列させ、

そのサイズをA'分布内の両sinc項が隣接するマイクロレンズ開口3 4及び3 5の中心において0となるように設定することである。即ち、

$$t_p [X', Y'] = \begin{cases} |X'| < \lambda F_p / d_m \text{ 及び} \\ |Y'| < \lambda F_p / d_m \text{ の場合 } 1 \\ \text{それ以外の場合 } 0 \end{cases} \quad \text{式30}$$

$$A' [X', Y'] = A_0' \operatorname{sinc}[(X' + Y')/d_m] \operatorname{sinc}[(X' - Y')/d_m]$$

式31

別のアプローチは、本質的には式28の方形開口振幅伝達関数をその自己畳込み(autoconvolution)によって置換する、アポダイズした(apodized)投影開口を使用することである。この変形を用いるとA'内のsinc関数がsinc<sup>2</sup>項に置換されるので、A'が0交差する隣接開口全体のクロストーク振幅は無視できるようになる。即ち、

$$t_p [X', Y'] = \begin{cases} |X'| < \lambda F_p / d_m \text{ 及び} |Y'| < \lambda F_p / d_m \text{ の場合} \\ (1 - |X'| d_m / (\lambda F_p)) (1 - |Y'| d_m / (\lambda F_p)) \\ \text{それ以外の場合 } 0 \end{cases} \quad \text{式32}$$

$$A' [X', Y'] = A_0' \operatorname{sinc}^2[X'/d_m] \operatorname{sinc}^2[Y'/d_m] \quad \text{式33}$$

(これらの変形アプローチは、マイクロレンズ開口3 2全体の照明の均一性を妥協させるか、または照明の均一性を維持するためにマイクロレンズ間隔d<sub>0</sub>を増加させなければならないという欠陥を有している。)

アポジゼーションアプローチは、僅かに異なる技術によっても実現することができる。投影開口に実際の物理的アポダイザを形成させるのではなく、開口領域全体のテーパー付きのプロファイルが、アポジゼーションプロファイルに類似するように開口照明フィールドA'を設計することによって、ビームを「実効的にアポダイズ」することができる。例えば、もしA"分布の第1回折ノードが投影開口の縁にあるように照明光学系及びイメージ源を設計すれば、これらの縁付近の

テー付き振幅分布はイメージ面分布 A' 内の回折テールを再び抑圧する傾向がある。(しかしながら、この利点に対するトレードオフは、A'' 分布をシフ

トさせるような位置合わせの不良、または振動に対するシステムの許容度が少ないことである。) 同様に、マイクロレンズ開口は、A' 分布の第1回折ノードをマイクロレンズ開口境界に配置することによって実効的にアポダイズすることができる。これは、ウェーハ面分布 A 内の回折テールを再び抑圧する傾向があるが、それと引換えに中心ピーク幅が増加する。

上述した開口設計アプローチは、顕微鏡システム並びにリトグラフィプリンタに適用することができる。(顕微鏡応用の場合、図 14 の源要素 33 は検出器要素として再解釈することができる。)

イメージクロストークが問題にならないような 1 つの応用がある。もしシステムが、マイクロレンズレイアウトと整合するパターン周期性を有する周期的パターンを印刷するために使用されていれば、全てのマイクロスポットにおける露光強度は同一になるので、総合露光レベルにおいて補償調整を行うことによってクロストーク効果を修正することができる。この応用の場合、イメージ源アレイは必要とせず、投影開口の中心に位置する変調された点源に置換してマイクロレンズアレイを均一に照明することができる。この型のシステムは、例えば、イメージ面マイクロレンズアレイを、複製(レプリカ)要素をリトグラフ的にパターン化するためのマスタリング要素として使用するような、マイクロレンズアレイの製造に使用することができる。(しかしながら、以下に説明する代替製造技術の方が、この方法よりも優れた利点を有している。)

#### マイクロレンズの構造

図 15 に、マイクロレンズ設計のための可能な構成を示す。各マイクロレンズは、薄い溶融シリカ板 37 の上面上の表面レリーフプロファイル 36 として形成されている。暗いクロムのようなリトグラフ的にパターン化された遮光層 38 を板の上面に沈積させてマイクロレンズ開口を限定する。板は、厚い溶融シリカスーパーストレート(supstrate) 39 に光学的に接触され、接着される。スーパーストレートの底面の部分はエッチングされ、光分散または回折表面 40 が形成

されており、この面が板の光学的に接触している領域の鏡面反射ビームを再抑圧する。スーパーストレートの上面は、マイクロレンズの明澄な開口領域全面に抗反射被膜42が施されている。(分散または回折表面領域、及び抗反射被膜

は、鏡面反射したビームが投影開口を通って戻るのを防いでいる。)

レーザ援助された化学エッチングに基づく製造プロセス(参照文献7、8)を図16a-gに示す。基本的な手順は、先ずホログラフィック構造プロセスを使用して低NAマイクロレンズのアレイを形成し(図16a-d)、次いでこのアレイをマスタリング要素として使用して正確にプロファイルされた高NAマイクロレンズのアレイを複製する(図16e-g)ことである。図16aにおいて、1対の正確に平行化された均一のレーザビーム43及び44が組合わされて干渉パターンを形成し、このパターンで溶融シリカ基体46上の厚いレジスト層45を露光する。次いで基体を90°回転させて2回目の露光を行うと、2つの直交する均一に離間した平行線のセットからなるレジストの潜像が得られる。この潜像を現像すると正弦状に厚みが変化するレジストが得られ(図16b)、反応性イオンエッチングプロセスによって基体内の正弦状表面プロファイル47に変換される(図16c、参照文献7、8)。表面高さプロファイルZ[X,Y]は、交差したシヌソイドからなる。即ち、

$$Z[X, Y] = Z_0 (\cos^2 [\pi X/d_m] + \cos^2 [\pi Y/d_m]) \quad \text{式34}$$

ここに、 $d_m$ はホログラフィックパターンの線周期であり、 $Z_0$ は定数である。形状はプロファイルピークの近傍においてほぼ放物面状であり、例えば $(X, Y) = (0, 0)$ 付近のプロファイル関数は次の近似形状を取る。

$$Z[X, Y] \approx Z_0 (2 - (\pi/d_m)^2 (X^2 + Y^2)) \quad \text{式35}$$

これらの放物面状の領域はマイクロレンズ要素として機能することができ、開口アレイ48はこれらの領域を区切って表面上に形成される(図16d)。開口アレイは、開口アレイとマイクロレンズとの正確なレジストレーションを確保するために図16aの露光セットアップを使用してホログラフ的に構成され、リトグラフ的にパターン化されたクロム層として形成される。

低NAマイクロレンズアレイは、高NAアレイを製造するための近接マスクとして使用することができる（図16e）。薄い溶融シリカ板37を厚い支持基体49と光学的に接触させ、レジスト50で覆う。レジスト上の小さいスポットのアレイ上にビームを合焦させる低NAマイクロレンズアレイ46を通して露光ビーム51を投影する（例えば、マイクロレンズ47がビームをスポット52上に

合焦させる）。各マイクロレンズはその焦平面に最適露光分布をイメージし、現像されたレジスト内に最適に輪郭付けされた表面プロファイルが得られる。（イメージング光学系に関しては後述する。）レジストプロファイルは、反応性イオノエッティングによって溶融シリカ板37に転写され、次いでリトグラフ的にパターン化された開口アレイ38が表面上に形成される（図16f）。（低NAマイクロレンズアレイ46は、開口アレイをリトグラフ的にパターン化するためにも使用することができる。）最後に、シリカ板37をスーパーストレート39に接着し、基体49から分離する（図16g）。

複製プロセス（図16e）に使用される露光光学系を図17に示す。長い拡散光源53は、投影システム54によってマスタリング要素46上に合焦される。投影システムの開口ストップはグレースケール透過マスクを含み、このマスクが各マイクロレンズ47によってその対応する露光スポット52上にイメージングされる。マスクの透過率プロファイルがレジスト露光分布を制御し、この分布自体は複製マイクロレンズの表面プロファイル形状36（図15）を決定する。基体49及びマスタリング要素46は、投影システムのフィールドの非均一性及びコヒーレンス効果のような要因による露光の非均一性を平均化するために、露光中に（それらの相対位置を固定したまま）ビームを横切って走査される。投影システム54は、要素46及び49が照明フィールドを横切って走査されても、開口マスク55の多重イメージをレジスト50に対して固定のままとするために、対物側上でテレセントリックであるように設計すべきである。

上述した製造方法の長所は、複製マイクロレンズの均一性及び配置の正確さが露光ツールのフィールドの均一性またはステッピング精度によって制限されることなく、マスタリング要素を製造するために使用される露光ビーム43及び4

4 (図16a) の均一性及び平行化精度だけによって決定されることである。更に、複製マイクロレンズアレイを露光ツールのイメージフィールドよりも遙かに大きくすることができる。

マスタリングマイクロレンズ要素または複製アレイの何れかのための、反応性イオンエッチャリングされたマイクロレンズには数多くの代替が存在している。可能性には、モデル化されたマイクロレンズ、屈折率分散型平面マイクロレンズ、マ

イクロフレネルレンズ（または2進光学系）、及び溶融樹脂アレイが含まれる（参照文献9の7章）。材料処理技術は異なっても、これらのマイクロレンズ型の大部分はフォトリトグラフィを使用して製造されるので、上述した露光技術はこれらの代替の型にも同じように適用することができる。例えば、上述したプロセスの1つの実際的な変形は、屈折率分散型平面要素としてマスタリングマイクロレンズを形成することである。この場合マスタリング要素46とレジスト50との間の空気隙（図16a、17）は、マスタリング要素46上に沈積させた誘電体層に置換することができる。従って複製マイクロレンズは、近接印刷によるのではなく、接触印刷プロセスによって形成されることになり、これは臨界的な空気隙公差要求を排除するという利点を有している。

### 投影及び照明光学系

リトグラフィシステム（図2）に関して言えば、イメージ源11は投影システム1の対物面を限定し、マイクロレンズアレイ2はそのイメージ面を限定する。個々のマイクロレンズの光軸が典型的には全て相互に平行であるので、一般的に投影システムは、イメージ側でテレセントリックであるべきである。もしDMDのようなイメージ源を使用すれば、投影システムは対物側でもテレセントリックであるべきである。図2の構成は、投影開口7をイメージ側上の無限遠にイメージするために平行化レンズ56を使用し、開口を対物側上の無限遠にイメージするためにも平行化レンズ57を使用している。投影開口7を含む開口レンズ（またはレンズシステム）58は、コリメータ56及び57と共にイメージ源11をマイクロレンズアレイ2上にイメージするように機能する。（イメージ源及びマイクロレンズアレイは、コリメータが単独でこのイメージング機能を遂行するよ

うに位置決めすることはできるが、それでも収差制御のために0倍率の開口レンズ58を必要としよう。)

図2の照明システム9は、コリメータ60、ビームスプリッタ13、及び投影光学系によって投影開口7上にイメージされる照明開口59を含んでいる。照明光学系を簡易化した代替設計構成を図18に示す。このシステムでは、ビームスプリッタ13は開口レンズ58内に組み込まれ、投影開口7及び照明開口59は共にビームスプリッタ表面上に直接形成されている。このシステムの長所は、ビ

ームスプリッタが極めて小型であり、開口7及び59が互いに自動的に位置合わせるために光学的位置合わせが簡易化されることである。

更に簡易な照明システムを図19に示す。ビームスプリッタは使用せず、照明は投影開口7に接する光ファイバ60のような小型の離軸した源によってシステム内に導入される。(離軸収差を平衡させるために、2進光学要素のような光学補正要素をファイバの前に組み込むことができる。) イメージ源11は、この構成の離軸照明で動作するように設計することができる。

図20は図19の構成の変形であって、2つのコリメータレンズ56及び57は1つの平行化鏡61に置換されている。マイクロレンズアレイ2及びウェーハ12を投影光学系から物理的に分離するために、フォールド(fold)鏡62を使用することができる。投影開口は反射性要素(例えば、低反射率基体64上に沈積された小さい方形の反射性パッド63)であり、開口レンズ58は双方に動作する。この構成の長所は、その色収差が極めて小さく、従ってかなり広い帯域幅の照明源(例えば、10nm帯域幅)と共に使用できることである。(光学ジオメトリは、開口レンズ58が本質的に無倍率であって単なる収差制御要素として機能するように、従ってその色分散が極めて小さくなるように設計することができる。マイクロレンズは高NA屈折性要素であるが、それらが小型サイズであるのでそれらのイメージング性能は色分散による影響を殆ど受けない。)

図21a、bに示す構成は、ウェーハ位置合わせ及び合焦を監視するための位置エンコーダとして使用される共焦点ピューリングシステムを含むことを除き、図20の構成と類似している。(このシステムは、機能的には図3のシステムに類

似している。) エンコーダシステムは、UVレジストの感光範囲外の633 nm Hg eNeレーザのような長波長光源を使用する。この構成内の反射性パッド63(図21b)は、UV露光波長においては高度に反射性であるが、エンコーダ波長においては透明な光学被膜からなり、基体64は両波長において透明である。(またこの被膜は、エンコーダ波長における透過光が被膜境界を横切って重大な位相不連続を呈さないように設計すべきである。) 基体の底面に形成されている第2の光学被膜65は、エンコーダ波長におけるビームスプリッタとして機能する。エンコーダのビューイング照明66は両被膜を通して投影され、UV光路に

併合される。次いでコリメータ61及びフォールド鏡62によって反射され、マイクロレーザアレイ2を通して伝送され、ウェーハ12から反射されて戻される。戻りビームは、ビームスプリッタ被膜65によって部分的に反射され、再度コリメータにより反射され、検出器アレイ14上に導かれる。波長が長いので、エンコーダシステムの最適開口サイズはUV露光システムのそれよりも大きくなるので(例えば、式27及び図14を参照されたい)、ビームスプリッタ被膜65はUV反射性パッド63の開口寸法よりも大きい開口寸法を有している。基体64の底面は複合ウェッジ角度に切断されているので、底被膜65から反射したビームは、上被膜63から反射したUVビームから空間的に分離される。

図21aはシステムの上面(コリメータ61を通して見た)図であって、フォールド鏡開口62、イメージング源11、及び検出器アレイ14の間の位置関係を示している。これは、1つの可能な構成を示しているに過ぎない。基体64の上及び底の両表面の傾きは、コリメータ開口61によって限定される領域内のがましい配列内に開口62、11、及び14を位置決めするように独立的に選択することができる。また、2つの反射性薄膜も、基体の両側上に(即ち、UV反射性薄膜63を底面に、そしてビームスプリッタ被膜65を上面に)配置することができるが、この場合にはビームスプリッタ被膜もUVに対して透明でなければならない)。

#### イメージ源

デジタルマイクロミラーデバイス(DMD、参照文献3)はマイクロリトグラ

ラフィのイメージ源として幾つかの好ましい特性を有している。即ち、デジタル的にプログラム可能なイメージ源がリトグラフィマスクの必要性を排除し、DMDの高フレームレート（例えば、10 kHz）は半導体生産のスループット要求を充分に満足し、そしてその画素サイズ（ $17\mu\text{m}$  中心間隔）は投影システムにおける単位倍率を可能にするのに充分に小さい。

DMDシステムの設計においては、2つのトレードオフを適切に平衡させなければならない。これらのトレードオフは、マイクロミラーの開口サイズ要求と表面形状の許容度、傾きの範囲と傾きの許容度、エンコーダ効率、及びイメージクロストークである。図22はこれらの要因を最適に釣合させるために、対物平面

マイクロレンズアレイをマイクロミラーと共に使用するイメージ源のための設計構成を示している。離軸照明ビーム（図19のファイバ照明具60によって発生されるビームのような）はマイクロレンズアレイ67によって点のアレイに合焦される。例えば、マイクロレンズ69が捕捉する照明ビーム68の部分は点70に合焦される。合焦された各ビームは、傾斜したマイクロミラー（その「オン」状態にある時）によって再捕捉され、焦点は、集束用マイクロレンズに隣接するマイクロレンズ開口の中心の屈折制限されたスポットへ再イメージされる。例えば、マイクロミラー71は点70を、マイクロレンズ69に隣接するマイクロレンズ73の中心の点72に再イメージし、次いで投影光学系は点72を、イメージ平面マイクロレンズアレイの対応する開口の中心上に再イメージする。マイクロミラーは、このイメージング機能を容易にするためにある固定された光学倍率を含むことができる。例えば、図22の要素71は凸面をなすように示されている（代替として、マイクロミラーは2進光学反射器として形成することができる）。光学倍率はこれらのマイクロミラー上に形成されたマイクロレンズによって、またはマイクロミラー開口に接して位置決めされた分離した、静止マイクロレンズによって与えることができる。）

照明源をマイクロレンズ開口上にイメージすることに加えて、マイクロミラー及びマイクロレンズはマイクロレンズ開口を投影開口上にイメージするようにも機能する。例えば、マイクロレンズ開口69の中心の点74は、マイクロミラー

71によって仮想イメージ点75にイメージされ、次いでこれがマイクロレンズ72によって（投影光学系と共に働いて）投影開口の中心上にイメージされる。（しかしながら、図22の要素76によって示されているように、マイクロミラーがその「オフ」位置にある時には、それは反射ビーム77を投影開口から逸らすように傾けられる。）

上述した設計構成の主たる長所は、対物平面マイクロレンズアレイ68全体の均一な照明が、イメージ源における開口損失を生ずることなく、反射ビーム内の屈折制限された点源のアレイに効果的に変換されることである。これにより、投影開口全体に制御された均等な照明分布A"が得られ、最小のピーク幅（図14）でイメージ面分布A'が得られる。実効源点72の屈折制限されたサイズは、マ

イクロレンズとマイクロミラー（例えば、要素69と71）の組合せの実効焦点距離によって決定され、イメージクロストーク抑圧とエネルギー効率との間のトレードオフを最適化するように設計することができる。（一般に、源点が小さい程A'分布の幅が減少するのでクロストーク抑圧は改善されるが、投影開口分布A"が広くなるために開口のオーバーフィリングによって光損失がもたらされる。図14を参照されたい。）図22の構成の別の長所は、マイクロミラー内に光学倍率を組み込むことによって、対物面マイクロレンズの焦点距離を短縮させることができ、投影開口分布A"をより広く広げることなくマイクロミラーをマイクロレンズにより接近せしめて位置決めできることである。これにより、より小型のシステムが得られ、マイクロミラー開口サイズ要求（即ち、充填ファクタ）を低下させることができる。（マイクロミラー内に光学倍率を組み込まなくとも、それらの開口はマイクロレンズのサイズの半分を必要とするだけである。）更に、表面形状の許容度及びマイクロミラーの傾きの許容度も緩和されるが、これらの長所は傾きの範囲要求を増加させ、マイクロレンズ内に光学倍率を組み込む必要性によって釣合わされる。

上述した設計アプローチは、ビームスプリッタの使用、及び関連光学効率損失を回避するという長所をも有している。また、離軸照明配列を使用することによ

って、マイクロミラーの傾きを受入れるべく投影システムの対物面を傾斜させる必要もなくなる。

DMDだけがイメージ源としてのオプションではない。図23に示す1つの代替では、対物面マイクロレンズアレイ79と共にフォトマスク78を使用している。(マイクロレンズは2進光学要素であることができる。) 投影システム1はアレイ79を、倍率を低下させてイメージ面マイクロレンズアレイ2上にイメージする。異なる反射率の小さいパッドからなるイメージ画素の濃密度のアレイがフォトマスク表面上に形成されている。任意の時点に、若干の画素が対物面マイクロレンズ合焦位置に位置決めされ(即ち、投影開口と共に役され)、マイクロレンズを通して反射モードで照明される。イメージ源要素は、対物面マイクロレンズ及び対応する照明された画素からなり、これらの要素は異なる画素を焦点の位置に持ってくるために焦点アレイを横切ってフォトマスクを走査することによつ

て変調される。「オン」画素は輝くクロムパッドによって表され、「オフ」画素は透明または吸収領域からなる。(クロムパッド上に高周波数エッチングされた格子を形成することによってグレーレベルの選択を設けることができる。) ウェーハ12及びフォトマスク78は共に同期して走査され、照明源は、マスク上のマイクロレンズ焦点が画素上に中心が合った時に露光が行われるようにストロープされる。(光源を実際に変調することなく照明を効果的にストロープする技術に関しては後述する。) このようにして、フォトマスクの反射率分布が、ウェーハ上の対応する露光分布に縮小されたサイズで写像される。

普通の石英上のクロムのフォトマスクでは、透過光とクロム側壁との相互作用が少ないので、一般に透過光照明は反射光照明よりも高品質のイメージングが得られる。しかしながら、投影開口によって縁散乱光が実質的に排除されるマイクロレンズシステムの場合には当てはまらない。また、画素は回折制限されたマイクロレンズの焦点よりもかなり大きいので、それ程大きい縁散乱は存在しない。例えば、ウェーハ面上に $0.1\mu m$ 周期を発生させるように設計されている $10\times$ の縮小システムを用いると、フォトマスク画素の中心間隔は $1\mu m$ になり、一方画素照明スポットの直径(第1回折ノードにおける全幅)は約 $0.5\mu m$ にしか過

ぎない（深UV照明と、約0.5のマイクロレンズNAであるものとする）。クロム縁との光学的相互作用を最小にすることに加えて、アンダーフィルされた画素開口は、マスクとウェーハとの間の走査同期エラーに対してある許容余裕度を与える。

もし、イメージクロストークを抑圧するためにイメージ面マイクロレンズを広く分離すれば、DMDシステム（図22）とは異なり、フォトマスクシステムは対物面マイクロレンズ内に照明を集中するためのメカニズムを有していないので、フォトマスク例は重大な光学的損失を受ける。効率とクロストーク抑圧との間の良好な妥協は、前記「開口設計」の項で説明した「実効アポジゼーション」技術を使用することによって達成することができる。対物面マイクロレンズ開口及び投影開口は投影開口上の振幅分布A'（図14）の第1回折ノードがほぼ投影開口境界にあるようにサイズが定められ、またイメージ面マイクロレンズ開口はイメージ面分布A'の第1回折ノードがほぼマイクロレンズ開口境界にあるように

サイズが定められる。この配列は、イメージ面における回折テールを最小にする傾向があり、重大なイメージクロストークを生ずることなくマイクロレンズ開口を極めて近づけることができる。

効率とクロストーク抑圧との間の妥協は、共焦点点イメージングを使用するのではなく、マイクロレンズを長いフィールドイメージングデバイスとして使用することによって回避することができる。このモードでは、マイクロレンズ及び投影開口のサイズがスケールアップするので、イメージ面マイクロレンズ開口及びマイクロスポットは共に回折限界よりも遙かに大きい。（しかしながら、共焦点イメージモードにおけるように、マイクロスポットの大きさはマイクロレンズ開口よりも少なくとも1桁は小さいので、このシステムはマイクロレンズが小さい角度フィールドにわたってのみ動作すればよいという長所を保持する。）マイクロレンズ開口寸法が大きいために、反射光を使用するのではなく、透過光を使用してフォトマスクを照明することが実行可能になるので、システムは普通のフォトマスクを使用することができ、位相シフティング及び斜め照明のような標準

イメージ強化技術を使用することができる。（レンズ開口を実際に極めて大きくする、例えば数ミリメートルの直径にすることができるので、ここでは「マイクロレンズ」という語は誤用であるかも知れない。）このシステムは普通の、モノリシックステッパ設計より優れた長所（例えば、小型、低価格光学系）を有しているが、共焦イメージングの主要長所（優れた横方向分解能及び深さ弁別、レンズアレイの幾何的及び色収差に対する不感応性、光学的コヒーレンス効果に対する低感受性）の若干が欠けている。

他の型のイメージ源メカニズムもマイクロレンズスキャナと共に使用することができる。例えば、反射性薄膜ストリップを、フォトマスクの代わりに使用することができる。上述した殆どのデバイス例は反射光照明を使用しているが、透過光も積極的に使用することができる。イメージ源は、例えば薄膜透明画、または液晶デバイス（LCD）であることができる。しかしながら、反射性媒体は光変調要素に極めて接近させた対物面マイクロレンズアレイによって、極めて小さい画素のアレイへ照明を合焦させる利点がある。更に、薄膜透明画のような透明媒体は、一般に深UV照明を効率的に透過させない。

### 照明源

図20に示す反屈折システムは、色収差が極めて少ないので、多分、濾波されたアーク灯のような極めて広い帯域幅（例えば、10nm）の照明源と共に使用することができる。これはI線（364nm）の場合に実現可能であるが、より短い波長の場合には充分な露光エネルギーを達成するために深UVレーザ源を必要としよう。

クリプトンフッ化物（248nm）またはアルゴンフッ化物（193nm）エキシマレーザのようなパルス化レーザは、極めて高い露光エネルギーを与えることができる。普通のシステムにおいてはそれらの高い色分散のために線狭めが必要であるが、反屈折システムでは必要ないであろう。エキシマレーザのパルス持続時間は、露光されるイメージ内に重大な点スミアリングを生じさせない程充分に短い（例えば、10ns）。エキシマレーザの主たる欠陥は、それらのパルス繰り返しレートが典型的に1kHzより低いことであり、これはDMDが達成可能なフレー

ムレートよりも遙かに低く、多分半導体生産の高いスループット要求に対しては遅過ぎる。この限界は、DMD内の画素の数を大きく増加させるか、または複数のマイクロレンズスキャナシステムを並列に動作させることによってのみ解消できるであろう。（多分、1つのレーザから幾つかのスキャナユニットに照明を供給できる。）

もしアーク灯のような連続照明源を使用すれば、フレームレートは制限を受けることはない。深UV応用の場合には、連続波・4倍周波数Nd:YAGレーザ(266nm)が魅力的なオプションであろう（参照文献6）。連続源を用いた時に当面する1つの問題は、マイクロレンズアレイとウェーハとの間の相対運動に起因するイメージ点スミアリングである。スミアリングを減少させる一方法は、極めて短時間の間各イメージフレームを露光させるように光源をシャッタリングして照明を効果的にストローブすることである。しかしながら、この方法は光効率に極めて大きい損失をもたらす。損失の大部分は、幾つかのスキャナユニットに供給する光源を使用することによって、多分回復することができる。（光源をシャッタリングするのではなく、幾つかのユニットを通して照明を順次に循環するために光スイッチングメカニズムを使用することになる。）しかしながら

実際には、照明源は複数のユニットに供給する充分なパワーを有していない。

点スミアリング問題の実際的な解決法は、照明光学系内にビーム走査メカニズムを含ませ、照明を狭い帯域、または1組の平行帯域に合焦させることによってビームを効果的にストローブし、それらをイメージ源を横切って高速で走査させることである。（概念的には、これは、異なるマイクロレンズスキャナユニット間でビームをスイッチングする代わりに、1つのユニット内の異なる領域間で効果的にスイッチすることを除いて、上述した光スイッチングアプローチに類似している。）この方法を図24及び25に示す。

図24は、パルス化光源を用い、普通の全フィールド照明を使用して、ウェーハ露光パターンに対してマイクロレンズをどのように位置決めするかを示している。小さい円（例えば、80）はウェーハ上の回折制限されたマイクロスポットを表しており、これらは変化する強度で露光されてフロースタイルを発生する。

大きい円 8 1 はマイクロレンズ開口を表し、“+”マーク 8 2 は特定の時点におけるマイクロスポットに対するマイクロレンズの合焦位置を表している。（図 2 4 を図 2 3 のシステムに関係付けて言えば、円が反射性パッドを表し、“+”マークが対物面マイクロレンズ 7 9 の焦点を表すような、フォトマスク 7 8 を表すものと解釈することができる。）ウェーハ（または、マスク）は走査方向 1 9 に並進させられ、光源は焦点がマイクロスポット上に中心が合っている時にパルス化される。

図 2 5 は、走査型照明技術を使用する露光ジオメトリを示している。照明は狭い帯域 8 3（または、1 組の平行帯域）に閉じ込められ、その（または、それらの）帯域を横切る方向 8 4 内の対物フィールド及びイメージフィールドを横切って走査される。マイクロスポットが照明される時間中、各マイクロレンズの焦点がマイクロスポットの中心を通過するように、ビームはウェーハ走査と同期して走査される。（図 2 5において、照明領域 8 3 の外側のマイクロレンズの焦点はマイクロスポット上に中心が合っていないが、それらが照明ビームによって横切られる時には中心が合った位置までウェーハ走査がシフトしていることに注目されたい。）

#### 位置決めフィードバック及び制御

図 3 及び 2 1 a、b に示す実施形態では、マイクロレンズアレイは光検出器アレイ 1 4 と共に、閉ループウェーハ位置決めサーボメカニズムへフィードバックを供給する位置エンコーダとして動作する。（図 2 3 のシステムのフォトマスクスキヤナを制御するために、類似の型のシステムを使用することができる。）エンコーダデータは、ウェーハの横方向位置（X 及び Y、但し、X は走査座標であり、Y は交差走査座標である）、合焦（Z）、傾斜（即ち、X 及び Y 軸を中心とする回転変位）、及び  $\theta$ （Z 軸を中心とする回転）を含むことができる。更に、システムはウェーハとマイクロレンズアレイとの間の表面の反りの分布（即ち、X 及び Y の関数としての Z）の測度を供給することができる。典型的には、位置エンコーダは露光波長とは異なるビューアング波長を使用するので、マイクロレンズアレイはエンコーダ波長のために特別に設計されたマイクロレンズ要素を含

む必要はない。（原理的には、二重波長マイクロレンズを設計することはできる。例えば、ハイブリッド回折・屈折設計を使用することができる。しかしながら、このような設計を実現することは困難であり、性能に妥協が求められる。）エンコーダマイクロレンズ要素は、露光マイクロレンズの二次元アレイの線形アレイ縁取りとして、またはその中に散在させて形成することができる。

X-Y位置感知は、マイクロレンズの周期的パターンの共焦点答を周期的追尾パターン上で測定するようなモアレ技術を使用することによって達成することができる。この技術を、X追尾に関して図26に示す。中心間隔 $d_c$ を有するマイクロレンズ $L_0$ 、 $L_1$ 、 $L_2$ 、…の周期的な行が、周期 $d_m$ を有する周期的追尾パターン（エッティングされた方形プロファイルのレリーフ格子のような）上に位置決めされる。追尾位置は、パラメータ $X_0$ （ウェーハをベースとする座標内のレンズ $L_0$ の合焦のX位置として定義される）の表現で指定することができる。（ $X_0$ は、時間と共に線形に変化する。）検出器要素は感光画素からなり、レンズ $L_0$ に対応する画素における、追尾位置 $X_0$ 及び画素数 $n$ の関数としての共焦点答信号 $S_n$ は、

$$S_n [ X_0 ] = S_0 [ X_0 + n d_m ] \quad \text{式36}$$

なる周期性関係を満足する。関数 $S_0$ は周期的モジュロ $d_c$ であり、

$$S_0 [ X ] = S_0 [ X \bmod d_c ] \quad \text{式37}$$

寸法 $d_m$ 、及び $d_c$ は、 $d_m$ 、が $d_c$ の整数倍に近いが、正確に等しくないように選択される。即ち、

$$d_m = k d_c + \delta \quad \text{式38}$$

ここに、 $k$ は整数であり、 $\delta$ は小さい値である（ $d_c$ よりもかなり小さい）。即ち

$$\begin{aligned} S_n [ X_0 ] &= S_0 [ (X_0 + n(k d_c + \delta)) \bmod d_c ] \\ &= S_0 [ X_0 + n \delta ] \end{aligned} \quad \text{式39}$$

ウェーハが距離 $\delta$ だけ運動すると、信号プロファイルは1画素だけシフトし、

$$\begin{aligned}
 S_{n+1}[X_0] &= S_0[(X_0 + (n+1)\delta)] \\
 &= S_0[(X_0 + \delta) + n\delta] \\
 &= S_n[X_0 + \delta]
 \end{aligned}$$

式40

従って、画素分解能共焦点は、 $\delta$ の分解能で、 $X_0$ を測定するために使用することができる。画素間の検出器信号を補間することによって、より良い分解能を達成できる。(分数画素数の関数としての) 補間された検出器信号は図27に示すような周期的モジュロ  $d_t/\delta$  になる。

$$S_{(n+d_t/\delta)}[X_0] = S_0[X_0 + (n + d_t/\delta)\delta] = S_0[X_0 + n\delta] = S_n[X_0] \quad \text{式41}$$

(式39及び37から)。信号周期  $d_t/\delta$  は極めて大きいので、検出器信号の位相はサブピクセル精度まで精密に測定することができ、 $X_0$ の測定精度は  $\delta$  よりもかなり良好になる。

実際には、異なる高さに合焦させるための数組の位置センサマイクロレンズを設けることができる。例えば、図28は異なる合焦の高さ  $h_1$ 、 $h_2$ 、及び  $h_3$  を有する3つの分散したマイクロレンズの組を示している。マイクロレンズは、レジストの異なる厚みを通しての合焦を球形補正することもできる。

図29は、X、Y、及び  $\theta$  回転を追尾するために使用できるパターンの上面(ウェーハ面を見下ろした)図を示している。2つの平行なトラックがウェーハのスライプライン内に形成され、各線はX-Y軸に対して  $45^\circ$  にエッチング

された平行なウェル85からなる。一方のトラック内のウェルは互いに直角である。マイクロレンズの行は、各トラック上に配置されている。特定の時点におけるマイクロレンズ合焦点は、図29に "+" マーク86で示してある。(マイクロレンズの何れかの行を通るX-Z面における断面ジオメトリは、上述したような、そして図26または28に示してあるような形状を有している。 $(X_0, Y_0)$  を1つの特定の焦点におけるウェーハをベースとする座標であると定義すれば、各マイクロレンズの行からの信号プロファイルの位相は X<sub>0</sub> 及び Y<sub>0</sub> の両方の関数であり、位相項の一方は X<sub>0</sub> + Y<sub>0</sub> に比例し、他方は X<sub>0</sub> - Y<sub>0</sub> に比例する。

2つの位相項の和は、X<sub>0</sub>の測度を与え、差はY<sub>0</sub>の測度を与える。更に、θが僅かに回転しただけで、2つの信号プロファイルの基本周波数に測定可能なシフトをもたらす。一方の周波数はθと共に増加し、他方は減少するので、2つの周波数の間の差はθの正確な測度を与えることができる。また2つの周波数の和を監視すれば、マイクロレンズアレイとウェーハとの間の熱膨張の不整合を検出することができる。追尾信号はデジタル的に解析することができ、またはアナログエレクトロニクスを使用して追尾信号を位置決め制御信号に変換することもできる。位置測定は多数の（例えば、1000の）マイクロレンズからのデータを使用して行われるので、位置フィードバックはマイクロレンズ、または追尾パターンの何れかの中の小さい欠陥、またはランダムな不正確さには不感応である。

もしウェーハステージが充分に正確且つ精密なエンコーダを有していれば、位置フィードバックは、マイクロレンズエンコーダから供給されるのではなく、簡単にステージエンコーダ自体から供給されるような、遙かに簡単な追尾方法を使用することができる。しかしながら、それでもマイクロレンズアレイに対してウェーハを正確に位置決めして位置を合わせ、マイクロレンズイメージングを使用して予備露光位置合わせすることができるようになる必要がある。位置合わせパターンは、粗位置決めのための大きい特色（例えば、グレーコードバーパターン）+図26、27に関連して上述したモアレ技術によって高分解能X及びY測定を得るための簡単な周期的な線／空間、またはチェックカーボードパターンを含むことができる。良好なθ測定精度を得るためにには、少なくとも2組の位置合わせパターンがウェーハ上の広く分離した位置に形成されよう。

他のX-Y位置合わせ技術も可能である。位置感知要素としてマイクロレンズアレイではなく、モアレ回折格子を使用することができる（参照文献10）。また、マイクロレンズアレイまたはモアレ回折格子のような光学位置エンコーダをウェーハステージ内に直接セットし、位置合わせパターンをウェーハの後側に形成することができる。このアプローチの幾つかの長所は、位置合わせパターンが貴重なウェーハの空間を占めないこと、それらがウェーハ処理ステップによって影響を受けないこと、及びステージに埋め込まれたエンコーダ要素とウェーハとの

間の密な光学的結合が位置合わせ精度の改善を援助することである。後側位置合わせ（及びモアレ格子を使用する上側位置合わせ）の主たる欠陥は、それがマイクロレンズアレイに対するウェーハ位置の直接的な測度を与えないで、位置合わせにはアレイと位置エンコーダとの間のX-Yオフセットの正確な較正が必要なことである。（この欠陥は、多分、各ウェーハ上で全ての製造プロセスを同一の露光ツールを使用して遂行することによって軽減することができる。X-Yオフセットに関する位置決めエラーは全てのプロセス層で同一になり、従ってオーバレイ精度に影響しない。）

ウェーハステージエンコーダは充分に正確且つ精密な位置フィードバック信号を供給することはできるが、システムが主位置決めフィードバックセンサとしてステージエンコーダに頼っていようと、いまいと、ステージ駆動メカニズム自体は充分に精密且つ敏感な位置制御を与えることはできないかも知れない。高慣性ステージ電動機はサブミクロンレベルの位置決め精度で、滑らか且つ均一な走査運動を行うことはできるが、約10 kHzのフレームレートでイメージを走査しながら $0.1\mu m$  レベル以下の位置合わせ精度を達成するには付加的な位置合わせ手段も必要とされる。

2つの相補的な精位置合わせメカニズムを、単独で、または一緒に使用することができます。一方は、マイクロレンズアレイに直接結合されている圧電アクチュエータのような極めて精密なX-Y位置変換器である。もしマイクロレンズ開口がオーバフィルされていれば、マイクロレンズ位置が横方向へ僅かにシフトしてもそれらの焦点が横方向へシフトするだけであり、合焦したスポット強度分布に重大な影響を与えることはない。このメカニズムは、マイクロレンズアレイの慣性が低いことから高速応答時間是有しているが、典型的には $0.1\mu m$  りも遙かに良好な分解能を有するアクチュエータを必要とする。（もしマイクロレンズアレイ自体が主位置フィードバックセンサとして機能しなければ、精位置合わせメカニズムの一部として付加的なX-Y位置エンコーダをマイクロレンズシステム内に組み込まなければならない。）図23の実施形態では、この技術をフォトマスク78と対物面マイクロレンズアレイ79との間のX-Y精位置合わせのために

使用することもできる。

第2のアプローチは、X-Y位置アクチュエータを投影開口上に配置することである。ウェーハ上の合焦されたスポットは投影開口の回折制限されたイメージであり、開口が充分にオーバーフィルされている限り、開口の並進シフトがスポットに対応する位置シフトを誘起させ得る。照明光学系は、照明エンコーダを開口上に心合わせさせ続けるために、開口アクチュエータと同期して動作するビーム舵取りメカニズムを含むことができる。このアプローチの長所は、開口の大きい位置調整が合焦されたスポット位置における非常に精な分解能シフトに変換されることである（例えば、1mmの開口シフトが、典型的には $0.1\mu m$ より充分に低いイメージシフトを誘起する。）図21a、bに示すシステム形態では、UV露光投影開口及びビューイング投影開口は共に共通基体64上に形成されているので、もし基体位置を精な位置合わせ制御のために調整すれば、検出器のX-Yフィードバック信号は常に位置合わせ補正が適用されたウェーハの相対位置を表していることに注目されたい。（この型のシステムは、閉ループ位置合わせ制御を行う。代替として、ビューイング開口薄膜65は固定したままでし、分離した可動基体上にUV開口薄膜63を沈積させ、検出器信号が精な位置合わせ補正を適用する前の相対ウェーハ位置を表すようにすることによって、開ループ設計を構成することができる。）

イメージフレームスイッチングをXエンコーダ信号に同期させることによって、X位置合わせを精調整することもできる。例えば、もし照明源がエキシマレー<sup>タ</sup>であれば、そのパルススイッチングをエンコーダ信号からトリガすることができる。代替として、もしDMDイメージ源を連続光源と共に使用していれば、画素スイッチング内に可変時間遅延を導入することによって、またはDMDのクロツ

ク信号をエンコーダ信号に位相ロックすることによって、フレームレートをXに同期させることができる。

X-Y追尾または位置合わせのための位置決めエンコーダとしての機能に加えて、マイクロレンズアレイは、合焦エラーを測定するためにも機能することができます。

きる。合焦位置 $Z$ の関数としての各マイクロレンズの正規化共焦点応答 $I[Z]$ は次の形状を有している。

$$I[Z] = \text{sinc}^2[(4Z/\lambda) \sin^2[\alpha/2]] \quad \text{式4.2}$$

ここに、 $\lambda$ は波長であり、 $\sin[\alpha]$ はマイクロレンズ開口数であり、そして $\text{sinc}[u] = \sin[\pi u]/(\pi u)$ である（参照文献1の11頁の式1.1）。例えば、図3.0は、波長 $\lambda = 0.633\mu\text{m}$ で動作している0.5NAシステムの共焦点応答を示している。曲線の半値全幅は $2.1\mu\text{m}$ である。合焦点エラーは、合焦点曲線に僅かな相対オフセットを有する2つの隣接するマイクロレンズの信号応答を比較することによって極めて正確に測定することができる。オフセットは、例えばマイクロレンズ内に設計することができる。図3.1は、焦点平面がそれぞれウェーハ表面1.2の上及び下に距離 $\Delta Z$ だけ変位している2つの合焦点センサマイクロレンズ8.7及び8.8を示している。

合焦点オフセットは、2つの焦点が同一の（パーフォーカルな）マイクロレンズを、異なるエッチング深さを有するウェーハ上の領域上に位置決めすることによって作ることができる。例えば、図3.2は合焦点センサマイクロレンズ8.7及び8.8がウェーハ表面の下の小さい距離 $\Delta Z$ だけ変位した共通焦点平面を有し、ウェーハ表面1.2の部分（例えば、スクリープライイン内の領域）が $2\Delta Z$ の深さにエッチングされているような構成を示している。（本質的に、マイクロレンズの焦点距離は色分散のために長い波長において大きくなるから、このアプローチは特別目的合焦点センサレンズを必要としないという潜在的な利点を有している。同じレンズセットを、UV露光点を上面に集束させるために、及び $0.633\mu\text{m}$ 放射を上面の下に合焦点させるために使用することができる。）何れかのアプローチ（図3.1または図3.2）を使用すると、一方のマイクロレンズの共焦点応答は $I[Z + \Delta Z]$ になり、他方の応答は $I[Z - \Delta Z]$ になる。2つの応答関数を組合わせると、以下に示す形状の自己正規化された集束フィードバック信号 $F[Z]$ が得

られる。

$$F[Z] = \frac{I[Z + \Delta Z] - I[Z - \Delta Z]}{I[Z + \Delta Z] + I[Z - \Delta Z]} \quad \text{式4.3}$$

波長  $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$  で動作し、 $\Delta Z = 0.5 \mu\text{m}$  の  $0.5 \text{NA}$  システムのためのこの関数を図 3 3 に示す。 $\pm 1.5 \mu\text{m}$  の範囲内では、関数は単調（モノトニック）であり、合焦位置と共にほぼ線形に変化する。

図 3 1 に示した概念を普遍化すれば、ある範囲の合焦の高さをカバーする 3 つまたはそれ以上のマイクロレンズセットを使用して、ある大きい距離の合焦位置にわたって精合焦能力を得ることができる。（または、図 3 2 の概念を拡張すれば、3 つまたはそれ以上の深さのエッチングを設けて、焦点が同一のマイクロレンズを用いて拡張された距離の合焦を得ることができる。）長距離集束要素は良好な精密さを有してはいないが、長い焦点距離の低  $\text{NA}$  マイクロレンズを使用して更に大きい距離にわたって粗合焦を得ることはできる。（合焦距離及び精度エラーは共に、 $1/\text{NA}^2$  に比例して変化する。）

合焦位置を測定することに加えて、アレイ上の広く分離した位置に分布させた 3 つまたはそれ以上の Z 位置エンコーダからの出力を組合わせることによって、ウェーハとマイクロレンズアレイとの間の相対的な傾きを測定することができる。多数の Z センサからの出力を組合わせることによって、アレイ全体にわたる完全 Z 高さマッピングも行うことができる。このデータは、反りひずみを測定するために使用することができる。

反り測定の一つのアプローチは、マイクロレンズアレイの先縁に沿う 1 行の Z センサを使用してウェーハをアレイの下で走査させると、ウェーハの反りの分布がラスター状にマップされる。しかしながら、この方法は、累積反りひずみ入手するためには分離して較正し、ウェーハの反りに追加しなければならないアレイ自体の固有の反りに関する情報は得られない。アレイの反りは、ある範囲の集束高さにわたる光学的平面（UV 照明を用いた）上の露光マイクロレンズの合焦応答を測定することによって較正することができる。反りを測定するより簡単な、そしてより頑丈な方法は、先縁行と平行な、且つアレイ内に分散させた数行の Z

センサ要素を使用することであろう。分散した Z センサを有するマイクロレンズレイアウトを図 3 4 に示す。これは、Z センサレンズ（ハッチした円で示す）が走査線に沿って分散されていることを除いて、図 6 の多重走査レイアウトに類似

している。例えば、隣接する走査線 8 9 及び 9 0 は、アレイの先縁の 2 つまたはそれ以上のマイクロレンズ 9 2 及び 9 3 からなる Z センサユニット 9 1 によってカバーされる。これらの要素はエンコーディング波長で動作するように設計されており、図 3 1 におけるように、固定された合焦オフセットを有している。(理想的には、要素 9 2 及び 9 3 は同一の走査線をカバーするが、図 3 4においてはこれらは僅かに Y 方向に変位しているので、マイクロレンズを方形アレイに展開することができる。) このユニットには、UV 露光レンズ 9 4 及び 9 5 、第 2 の Z センサユニット 9 6 、及び露光レンズ 9 7 及び 9 8 等が続く。(図 3 4においては、レンズの 1/3 が Z センサ要素として示されているが、実際にはこの比は 1% またはそれ以下に近くすることができる。)

測定された反りによる合焦エラーは、アレイ内に反り分布の補償を導入することによって動的に補正することができる。補正用の反りは、マイクロレンズアレイの周辺に沿って応力分布を適用することによって(例えば、圧電変換器によって)生成される。極めて一般的な反り分布を、この方法によって導入することができる。アレイの内部には垂直力は存在せず、交座標 X 及び Y の関数としての誘起された Z 変位  $\delta Z[X, Y]$  は、一般薄板平衡方程式によって表される。

$$\frac{\partial^4 \delta Z}{\partial X^4} + 2 \frac{\partial^4 \delta Z}{\partial X^2 \partial Y^2} + \frac{\partial^4 \delta Z}{\partial Y^4} = 0 \quad \text{式 4 4}$$

(参照文献 11 の 727 頁の式 13. 41 から。) この方程式の解は、 $\delta Z$  の境界値及びその勾配によって決定され、従ってアレイ周辺における表面高さ及び勾配を制御することによって、原理的には上式を満足する反り分布を生成することができる。例えば、X 及び Y における一般的な三次多項式の形状を有する反り分布を誘起させることができる。

上述した技術は、以下のように、実際に実現することができる。ウェーハ表面に対して集束高さ  $Z_1, Z_2, \dots$  を与えるマイクロレンズアレイの内部に Z センサ

が分散されているものとする。アレイの周辺付近に分散されている応力アクチュエータは、電圧  $V_1, V_2, \dots$  によって制御される。印加電圧の変化  $\delta V_1, \delta V_2, \dots$  は小さい合焦高さ変位  $\delta Z_1, \delta Z_2, \dots$  を誘起させ、これらはほぼ線形の電圧

依存性を有している。

$$\delta Z_i = \sum_j C_{ij} \delta V_j \quad \text{式45}$$

$C_{ij}$  は一定の較正係数であり、これは光学的平面上に合焦させて種々の電圧組合わせを印加した時に誘起した反り分布を測定することによって決定することができる。式45は、以下のように行列表記法で表すことができる。

$$\delta Z = C \delta V \quad \text{式46}$$

マイクロレンズアレイの動作モードでは、集束高さ  $Z_1, Z_2, \dots$  は動的に測定され、設計合焦高さ（設計に入っているウェーハトポグラフィを補償してある）から減算することによって計算された高さ補正  $\delta Z_1, \delta Z_2, \dots$  が求められる。次に、式46を使用して、計算された補正を誘起する制御電圧調整を計算することができる。典型的にはアクチュエータより多くのZセンサが存在しているので、一般的に式46を正確に解くことはできないが、最小自乗最小化によって近似的に解くことはできる。

$$\delta V = (C^T C)^{-1} C^T \delta Z \quad \text{式47}$$

ここに、 $C^T$  は  $C$  の行列転置である。フィードバック振動を制動するために若干の変更を行うと、式47は精合焦、傾き、及び反り補償の閉ループ制御を行うアルゴリズムの基礎として役立たせることができる。

図35a、bは、マイクロレンズアレイの6軸微小位置決め制御プラス反り補償を行うシステムの上面図及び側断面図である。マイクロレンズは極めて薄い溶融シリカディスク上にエッティングされた表面レリーフパターンとして形成されており（図15参照）、このディスクは支持用溶融シリカスーパーストレート39上に結合されている。スーパーストレートはディスク形状であり、若干のたわみ性を有するように充分に薄く、その底面はその周辺に僅かな、浅い傾斜を有していてディスクがたわんだ時にウェーハ間隙ができるようになっている。このス

ーパーストレートは垂直に分極された圧電パッド（例えば、101及び102）によって堅固なフランジ付き管状要素100に取付けられている。圧電パッドは、スーパーストレートの周辺のZ高さ分布を制御する。パッドは要素対にされて円

周方向に配列されており、各対の要素（例えば、要素101及び102）は、スーパーストレートの周辺における表面勾配を制御するために、それらが反対方向に動作できる（例えば、一方が収縮し、他方が伸長する）ように半径方向に変位している。

管状要素100の外面は3つの平面を有しており、それらの上に圧電ずらし板（例えば、103）が結合されている。各板の外面は板ばね（例えば、104）に結合され、板ばねは支持用外側管105に取付けられている。各圧電板は、3つの板がX、Y、及び $\theta$ 微小位置決め制御を行うように作動させることができるよう、水平に、且つ取付けられている板ばねに平行に分極されている。外側管105は、普通の顕微鏡合焦メカニズム（初期の粗合焦調整のために使用されるが、走査露光動作中、通常はロックされている）内に収容することができる。

図36は、好ましい実施形態における、上述した種々のフィードバック及び制御メカニズムを要約したシステムレベル概要図である。（実際のマイクロリトリグラフィ露光ツールは、必ずしも図36に示す要素の全てを必要としない。）図中、光路は太い実線で示されており、電子データまたは信号経路は細い実線で表されており、そして機械的制御リンクージは破線で示されている。「コントローラ」106は、1つまたはそれ以上のコンピュータ、デジタルマイクロコントローラ、アナログ回路、またはこれらの要素の組合せからなることができる。コントローラは、ウェーハ走査、DMDイメージフレーム生成、及び（オプションで）照明ビームスキャナ107を同期させ、また走査位置決めエラーを動的に補正するフィードバックループを制御する。光検出器信号は、走査中に動的な合焦、傾き、及び反り測定を行い、上述したモアレ技術による予備露光位置合わせのために高分解能X-Y及び $\theta$ 位置データも供給する。多分、モアレ信号は動的走査制御のために使用することもできるが、それは精X-Y走査位置感知のためのステージエンコーダ108に頼る方がより実際的であろう。粗X-Y走査の作動はステージ電動機109によって行われ、高分解能X-Y走査位置決め、並びに合焦、

傾き、及び反り補正是マイクロレンズアレイに結合されている圧電アクチュエー

タ110によって行われる。(圧電サーボメカニズムはそれ自体の位置エンコーダ111を有している。) 精X-Y走査制御も、オプションで、投影及び照明開口に結合されている機械的アクチュエータ112及び113によって行われる。

### 式11及び12の導出のための表記法

以下の導出においては、引き数 $x, y, \dots$ を取る関数 $f$ を表すために、以下の表記法を使用する。

$$(f[x, y, \dots] | x, y, \dots)$$

(上記表現は「引き数 $x, y, \dots$ に適用した時に、 $f[x, y, \dots]$ 」を与える関数」と読む。) また、関数 $f$ のフーリエ変換は以下のように表記される。

$$\mathcal{F}[f] = (\int \dots \int f[x, y, \dots] \exp(i2\pi(xx' + yy' + \dots)) dx dy \dots | x', y', \dots)$$

ここに、 $\mathcal{F}$ は、 $f$ がどれ程多くの引き数を取るかに依存して、一次元フーリエ変換、または二次元変換等を表す。これは、フーリエ変換の「ユニタリ」形状であり、指數内に $2\pi$ 係数を有している。この決めでは、逆変換 $\mathcal{F}^{-1}$ は次の形状を有している。

$$\mathcal{F}^{-1}[f] = (\int \dots \int f[x', y', \dots] \exp(-i2\pi(xx' + yy' + \dots)) dx' dy' \dots | x, y, \dots)$$

畳込み演算convは次のように定義される。

$$\text{conv}[f, g] = (\int \dots \int f[x^1, y^1, \dots] g[x-x', y-y', \dots] dx' dy' \dots | x, y, \dots)$$

但し、これは、 $f$ 及び $g$ の型に依存して、一次元畳込み、または二次元畳込み等を表すことができる。また、ディラックのデルタ関数 $\delta$ 、及び以下のように定義されるディラックのコーム(comb)関数を使用する。

$$\text{comb}(x) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \delta[x-j]$$

### 面露光理論の導出(式11)

式11は、式9の以下の等価形状を使用することによって導出される。

$$E_{\text{plane}} = \text{conv}(|A|^2, (\text{comb}(x/s) \text{comb}(y/s) / s^2 | x, y)) \quad \text{式A1}$$

式A1の両辺のフーリエ変換を取り、畳込み理論 ( $\mathcal{F}[\text{conv}[f, g]] = \mathcal{F}[f] \cdot \mathcal{F}[g]$ ) を適用し、そして関係 $\mathcal{F}[\text{comb}] = \text{comb}$ を使用することによって、

$$\mathcal{F}[E_{\text{plane}}] = \mathcal{F}[|A|^2] \cdot (\text{comb}[x's] \text{ comb}[y's] | x', y') \quad \text{式A 2}$$

再度疊込み理論 ( $\mathcal{F}[f, g] = \text{comb}[\mathcal{F}[f] \cdot \mathcal{F}[g]]$ ) を適用すると、式A

2の右辺の第1項は、

$$\mathcal{F}[|A|^2] = \text{conv}[A', (A'[-x', -y'])^* | x', y')] \quad \text{式A 3}$$

に変換される。開口関数  $A'[x', y']$  は原点に心合わせされた半幅  $NA_m$  の方形の外側では何処でも 0 である。即ち、

もし  $|x'| > NA_m$ 、または  $|y'| > NA_m$  ならば、

$$A'[x', y'] = 0 \quad \text{式A 4}$$

これから、式A 3 は半幅  $2NA_m$  の方形の外側では 0 であることが導かれる。

もし  $|x'| > 2NA_m$ 、または  $|y'| > 2NA_m$  ならば、

$$\text{conv}[A', (A'[-x', -y'])^* | x', y')] = 0 \quad \text{式A 5}$$

しかしながら、式A 2 の comb 項は  $x'$  及び  $y'$  が  $1/s$  の整数倍である点に位置するデルタ関数の重疊からなるので、 $s < 1/(2NA_m)$  という仮定の下では（式10）、 $(x', y') = (0, 0)$  における 0 次項を除くこれらのデルタ関数の全ては開口関数によってマスクされよう。

$$\mathcal{F}[E_{\text{plane}}] = \mathcal{F}[|A|^2] \cdot (\delta[x's] \delta[y's] | x', y') \quad \text{式A 6}$$

この式の両辺の逆フーリエ変換を取ると、

$$E_{\text{plane}} = \text{conv}[|A|^2, (1/s^2 | x, y )] \quad \text{式A 7}$$

が得られ、これは式11と等価である。

#### 線露光理論の導出（式12）

式12は、式8の以下の等価形状を使用することによって導出できる。

$$(E_{\text{line}}[x, y] | y) = \text{conv}[(|A[x, y]|^2 | y), (\text{comb}[y/s]/s | y)] \quad \text{式A 8}$$

式A 8 の両辺の逆フーリエ変換を取り、（1次元）疊込み理論を適用すると、

$$\mathcal{F}[(E_{line}[x, y] + y)] = \mathcal{F}[(|A[x, y]|^2 + y)] \cdot (\text{comb}[y's] + y) \quad \text{式A 9}$$

再び畳込み理論を適用すると、式A 9の右辺の第1項は、

$$\begin{aligned} \mathcal{F}[(|A[x, y]|^2 + y)] &= \\ \text{conv}(\mathcal{F}[(A[x, y] + y)], \mathcal{F}[(A[x, -y]^* + y)]) \end{aligned} \quad \text{式A 10}$$

$A$ 乃至 $A'$ に関する二次元フーリエ変換演算（式3、 $A' = \mathcal{F}[A]$ ）は、 $x$ 及び

$y$ 座標に順次に適用される2つの一次元フーリエ変換の合成に等価である。

$$\begin{aligned} A'[x', y] &= \mathcal{F}[A][x', y] = \\ \mathcal{F}[(\mathcal{F}[(A[x, y] + y)][y]) + x][x] \end{aligned} \quad \text{式A 11}$$

従って、 $y$ 変数に対する $A[x, y]$ のフーリエ変換は、将に $x'$ に対する $A'[x', y]$ の逆フーリエ変換に等価である。

$$\mathcal{F}[(A[x, y] + y)][y] = \mathcal{F}^{-1}[(A'[x', y] + x)][x] \quad \text{式A 12}$$

$|Y'| > NA_s$ の場合 $A'[x', y'] = 0$ （式A 4）であるから、これは、

$$\begin{aligned} |Y'| > NA_s, \text{ の場合に} \\ \mathcal{F}^{-1}[(A'[x', y'] + x)][x] \end{aligned} \quad \text{式A 13}$$

でもある。従って、式A 12から、式A 10の畳込み演算の両引き数は、0を中心とする半幅 $NA_s$ 、の間隔の外側では0であり、従って、

$$\begin{aligned} |Y'| > NA_s, \text{ の場合、} \\ \text{conv}[\mathcal{F}[A[x, y] + y], \mathcal{F}[A[x, -y]^* + y]][y'] = 0 \end{aligned} \quad \text{式A 14}$$

$s < 1/(2NA_s)$ という仮定の下では、式A 14から、式A 9のcomb項を構成している0次項を除く全てのデルタ関数は、開口関数によってマスクされることになる。従って、式A 9は、

$$\mathcal{F}[(E_{line}[x, y] + y)] = \mathcal{F}[(|A[x, y]|^2 + y)] \cdot (\delta(y's) + y) \quad \text{式A 15}$$

に等価である。式A 15の両辺の逆フーリエ変換を取ると、

$$\begin{aligned}
 & (E_{\text{line}}[x, y] | y) \\
 & = \text{conv}[(|A[x, y]|^2 | y), (1/s | y)] \quad \text{式 A 1 6}
 \end{aligned}$$

が得られ、これは式 12 と等価である。

### 結論

結論として、本発明が高分解能及びフィールドサイズを達成するイメージング

システム及び技術を提供することが理解されたであろう。本発明によるシステムは、既存のマイクロリトグラフィック及び他の光学技術を使用して容易に製造することができる。従って、本発明は普通の広フィールド、高 NA 顕微鏡、及びマイクロリトグラフィシステムを特徴付けている複雑さ、及び価格を減少させる。更に、本発明は、平坦なフィールド、ひずみの無いイメージングを、極めて大きい（普通のイメージング手段の実際的な限界よりも大きい）イメージフィールドにわたる正確なオーバレイ、合焦、及び反り補償と共に可能にするという潜在的性能の長所を提供する。一実施形態において、本発明は、ディジタルマイクロミラーデバイスをイメージ源として使用し、半導体製造におけるフォトマスクの必要性を潜在的に排除する。

以上に本発明の特定の実施形態を完全に説明したが、種々の変更、代替構造、及び等価を使用することができる。従って、以上の説明は、請求の範囲に記載されている本発明の範囲を限定するもの理解すべきではない。

参照

参照文献1：T. Wilson (Editor), *Confocal Microscopy*, Academic Press, San Diego (1990).

参照文献2：D. J. Elliott, *Integrated Circuit Fabrication Technology* (2nd Ed.), McGraw-Hill, New York (1989).

参照文献3：J. B. Sampsell, "An Overview of the Performance Envelope of Digital Micromirror Device (DMD) Based Projection Display Systems," Society for Information Display 1994 International Symposium (San Jose, CA, June 12-17, 1994).

参照文献4：W. B. Hugle, *Lens Array Photolithography*, U.S. Patent 5,517,279 (1996).

参照文献5：R. Volk et. al., "Microlens array imaging system for photolithography," *Optical Engineering* 35(11), 3323-3330 (1996).

参照文献6：H. Suganuma et. al., "Deep UV lithography using continuous-wave 266 nm radiation from all solid-state frequency quadrupled Nd:YAG laser," *Proc. SPIE*, 2440, 126-135 (1995).

参照文献7：E. J. Gratrix and C. B. Zarowin, "Fabrication of Microlenses by Laser Assisted Chemical Etching (LACE)," *Proc. SPIE*, 1544, 238-243 (1991).

参照文献8：M. Eisner and J. Schwider, "Transferring resist microlenses into silicon by reactive ion etching," *Optical Engineering* 35 (10), 2979-2982 (1996).

参照文献9：M. Bass, ed., *Handbook of Optics*, 2<sup>nd</sup> ed., vol. 2, McGraw-Hill, New York (1995).

参照文献10：Y. C. Park and S. W. Kim, *Method and Apparatus for Measuring Two Dimensional Plane Displacement by Moire Fringes of Concentric Circle Gratings*, U.S. Patent 5,459,578 (1995).

参照文献11：W. D. Pilkey and W. Wunderlich, *Mechanics of Structures: Variational and Computational Principles*, CRC Press, Boca Raton (1994).

【図1】

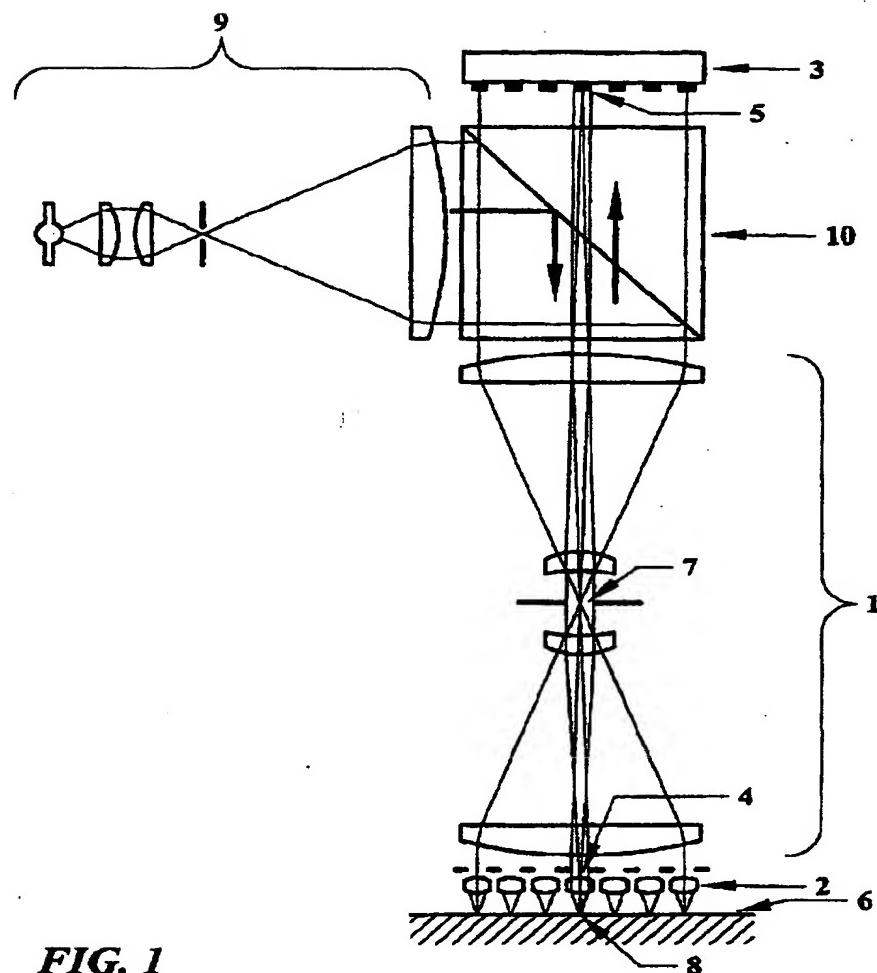


FIG. 1

【図2】

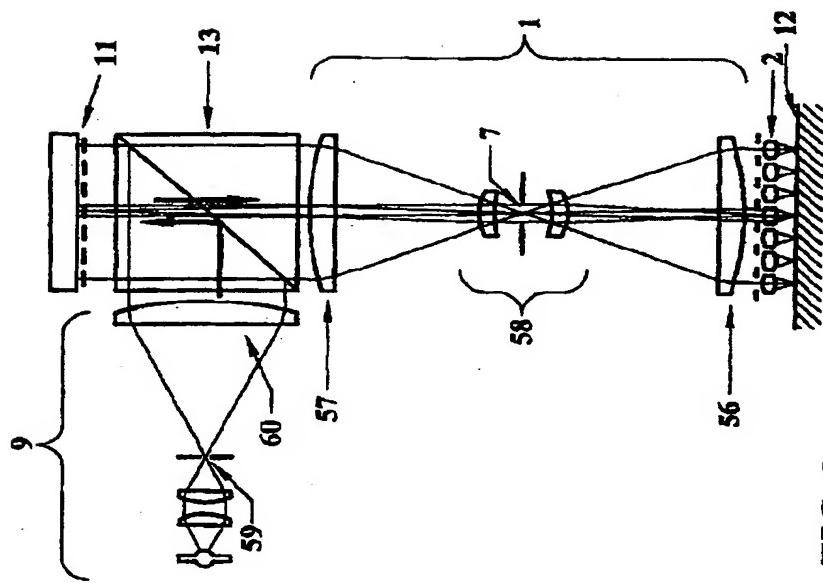


FIG. 2

【図3】

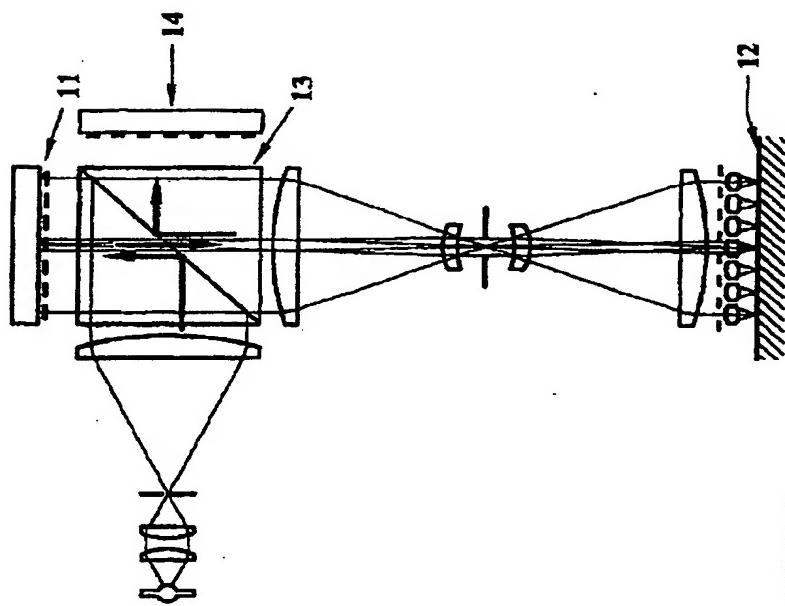


FIG. 3

【図4】

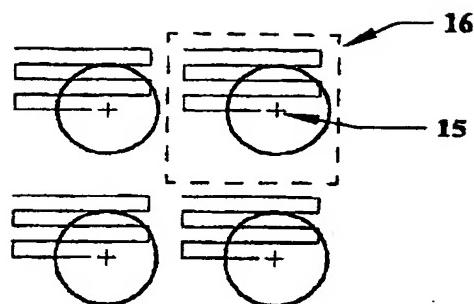


FIG. 4

【図5】

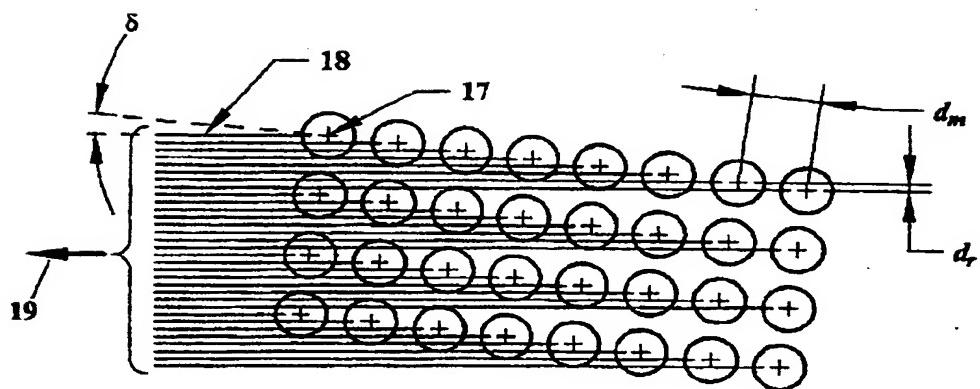


FIG. 5

【図6】

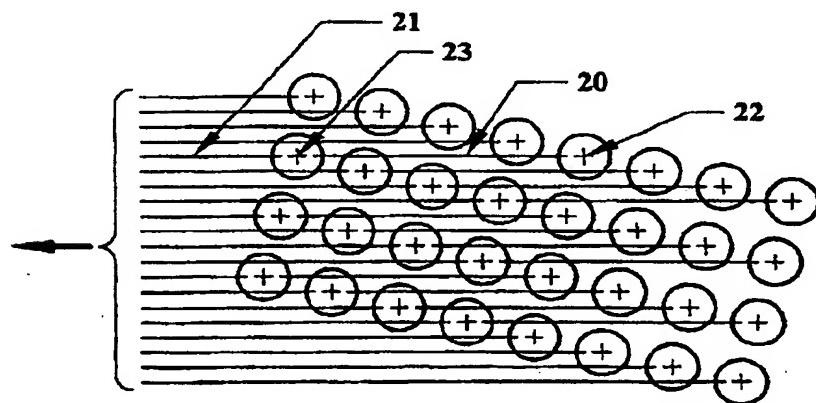


FIG. 6

【図7】

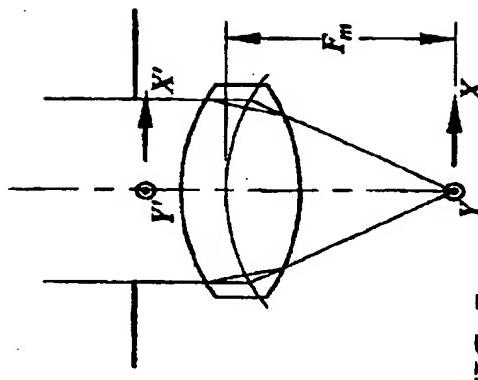


FIG. 7

【図8】

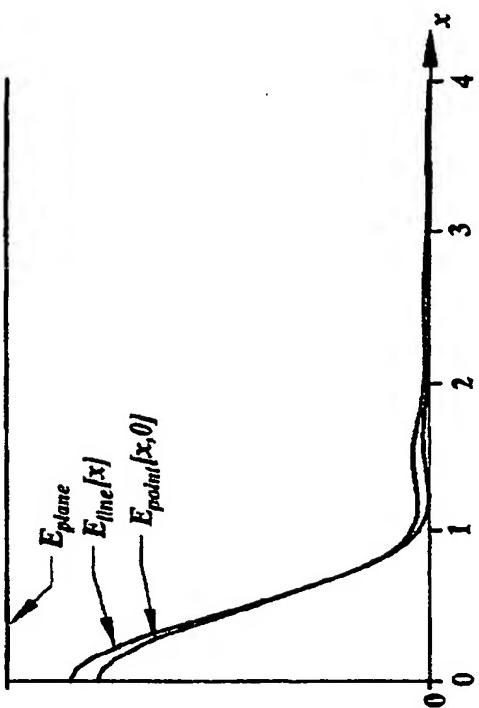


FIG. 8

【図9】

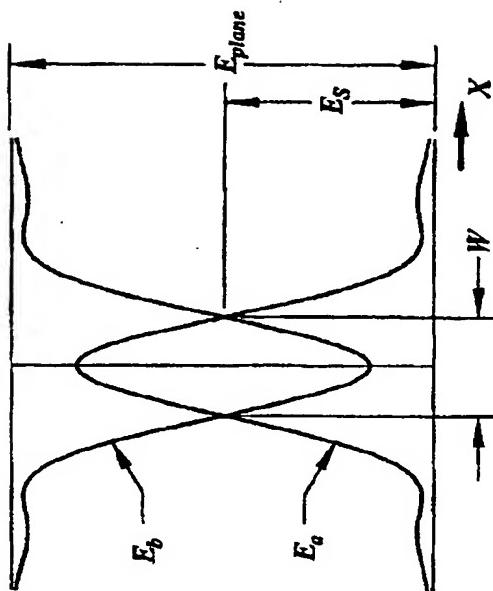


FIG. 9

【図10】

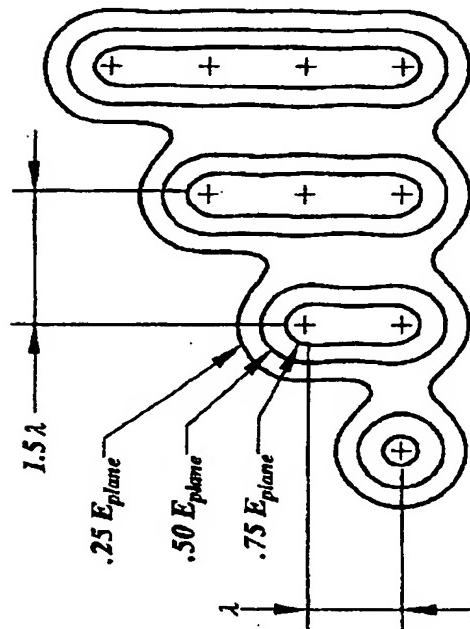


FIG. 10

【図11】

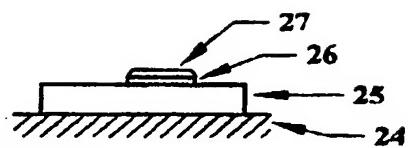


FIG. 11a

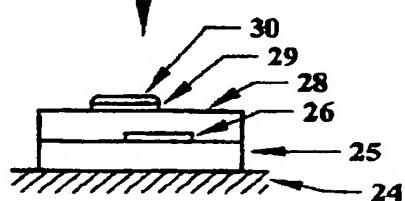


FIG. 11b

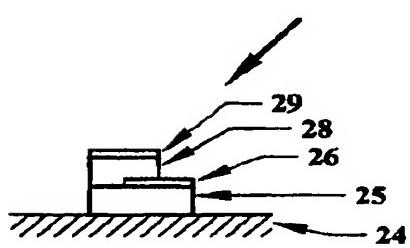


FIG. 11c

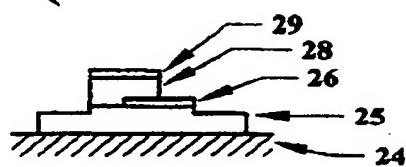


FIG. 11d

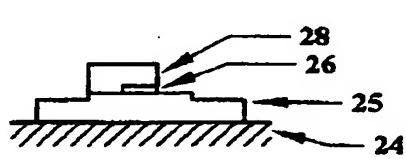


FIG. 11e

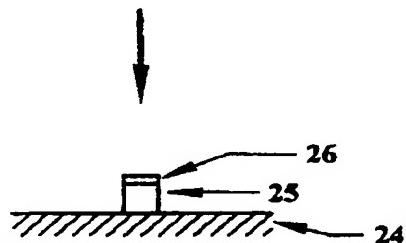
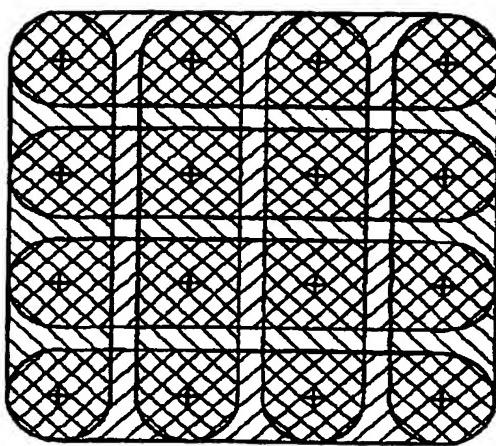
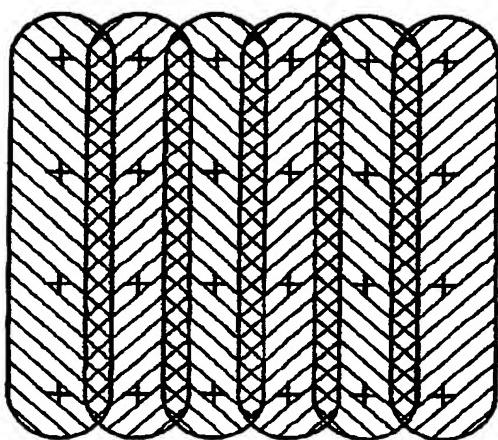


FIG. 11f

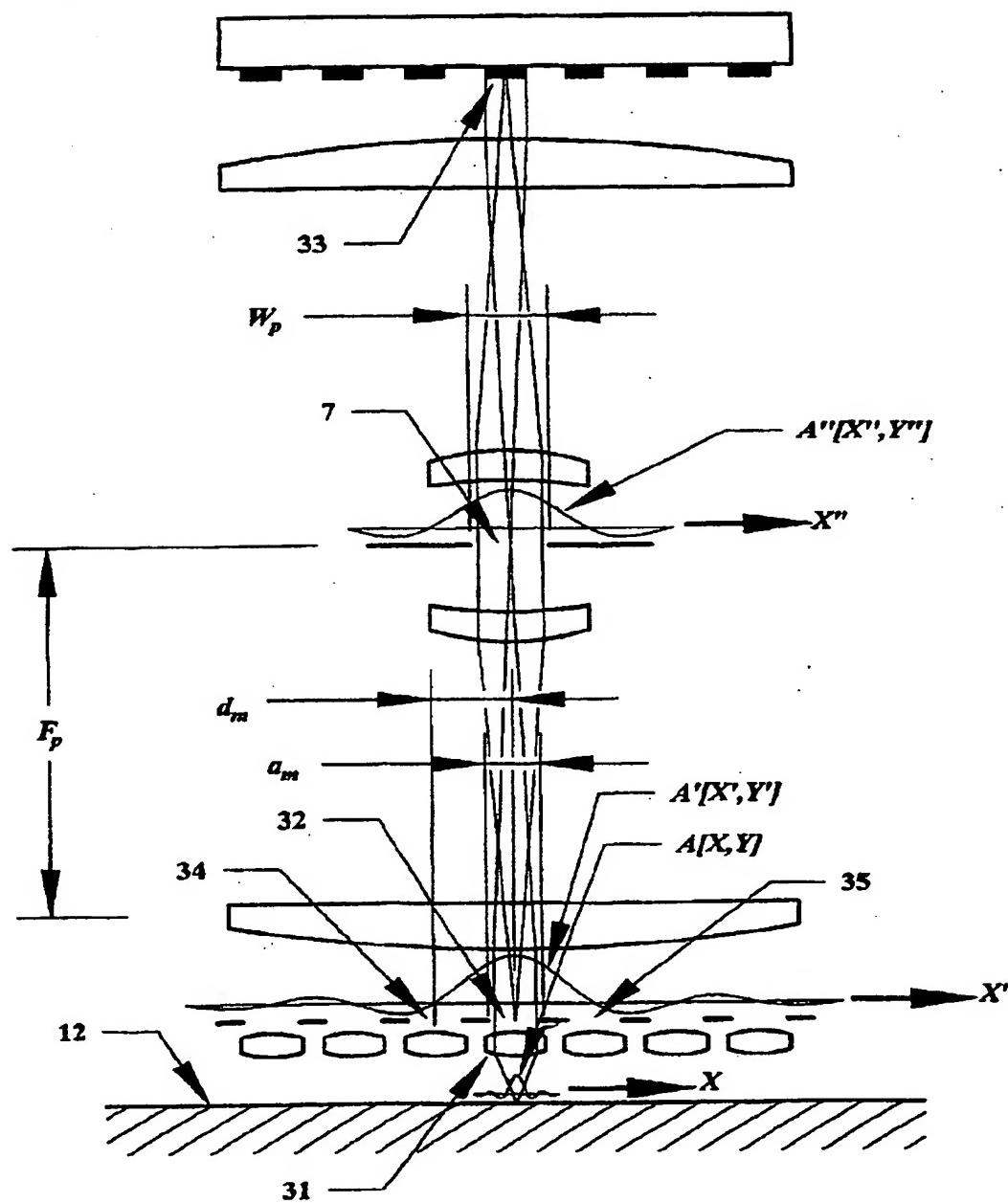
【図12】

**FIG. 12**

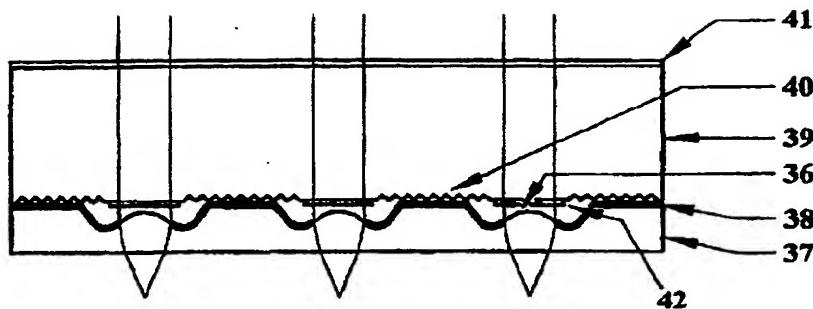
【図13】

**FIG. 13**

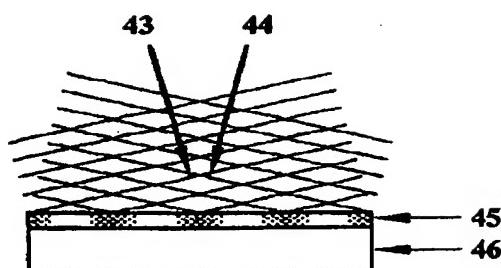
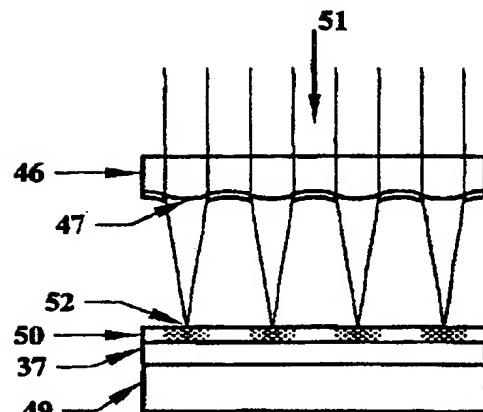
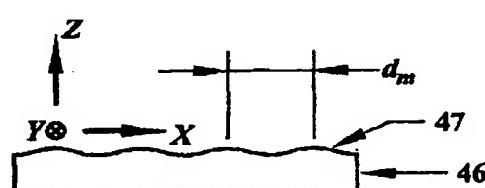
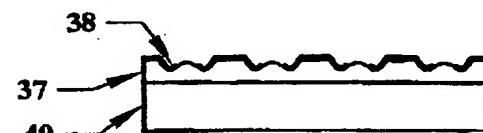
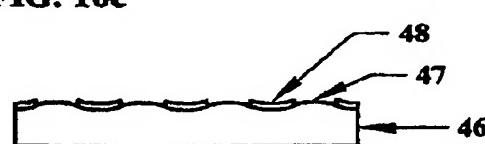
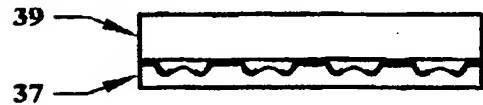
【図14】

**FIG. 14**

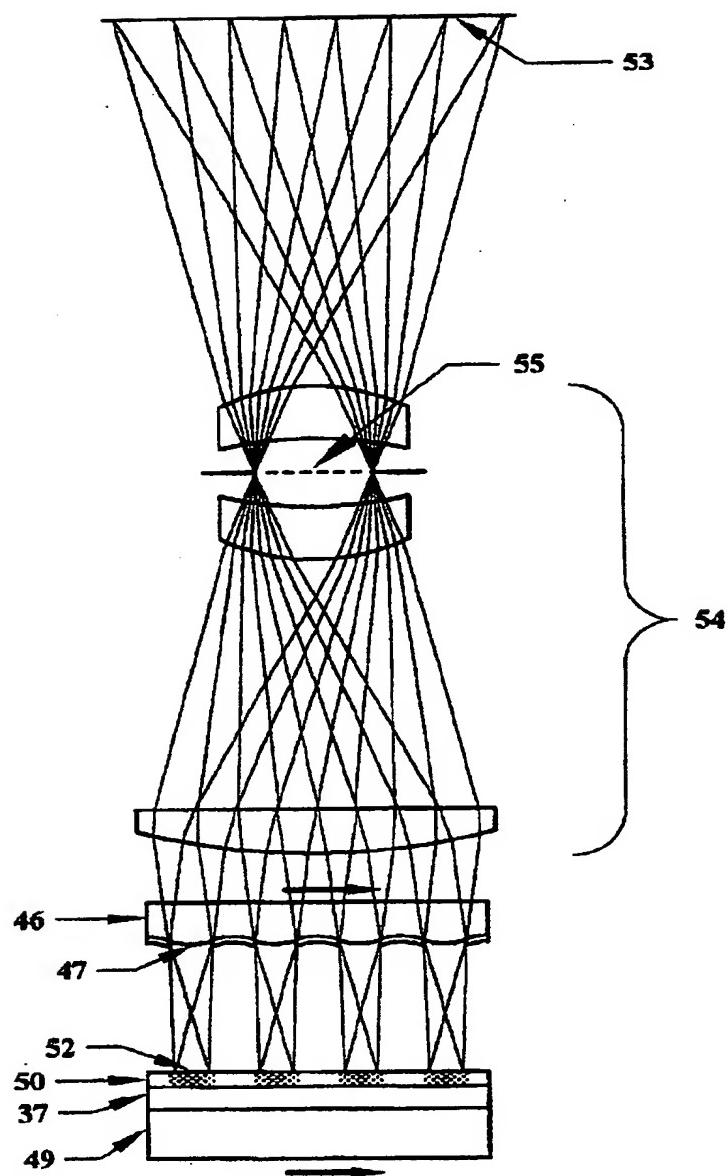
【図15】

**FIG. 15**

【図16】

**FIG. 16a****FIG. 16e****FIG. 16b****FIG. 16c****FIG. 16f****FIG. 16d****FIG. 16g**

【図17】

**FIG. 17**

【図18】

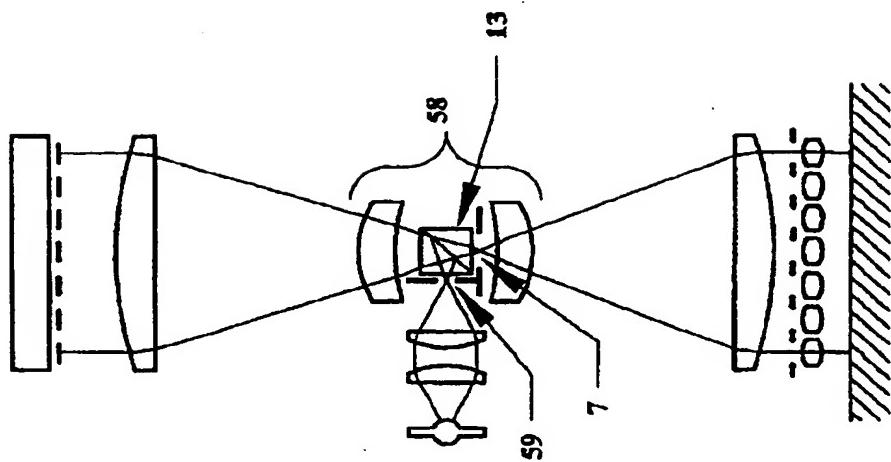


FIG. 18

【図19】

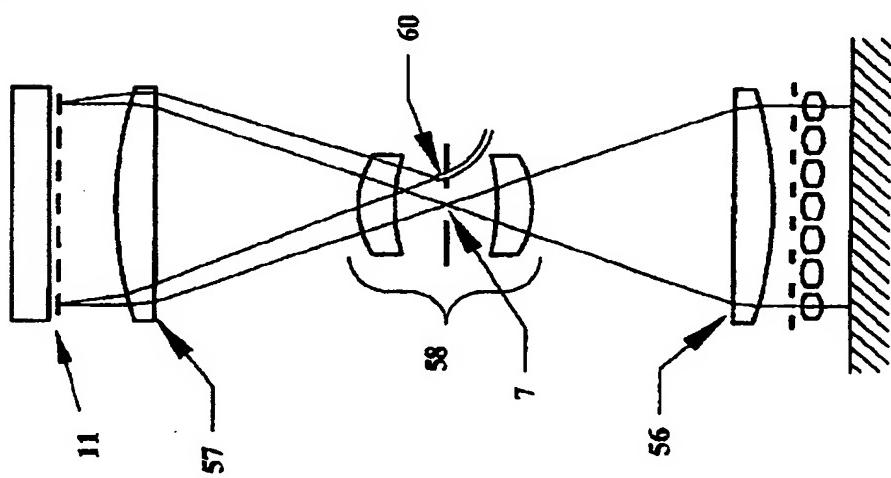


FIG. 19

【図20】

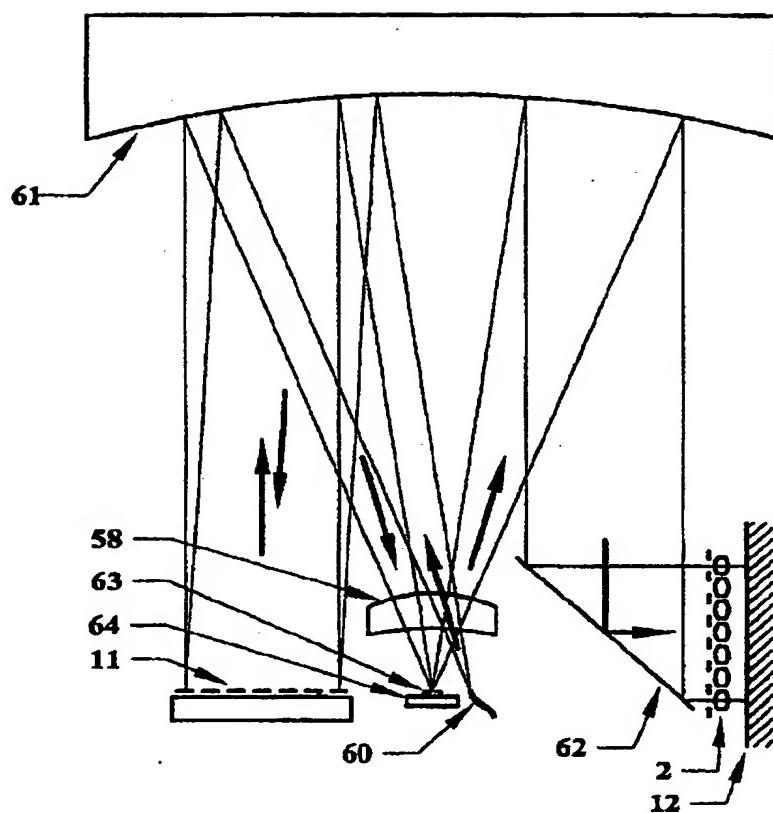
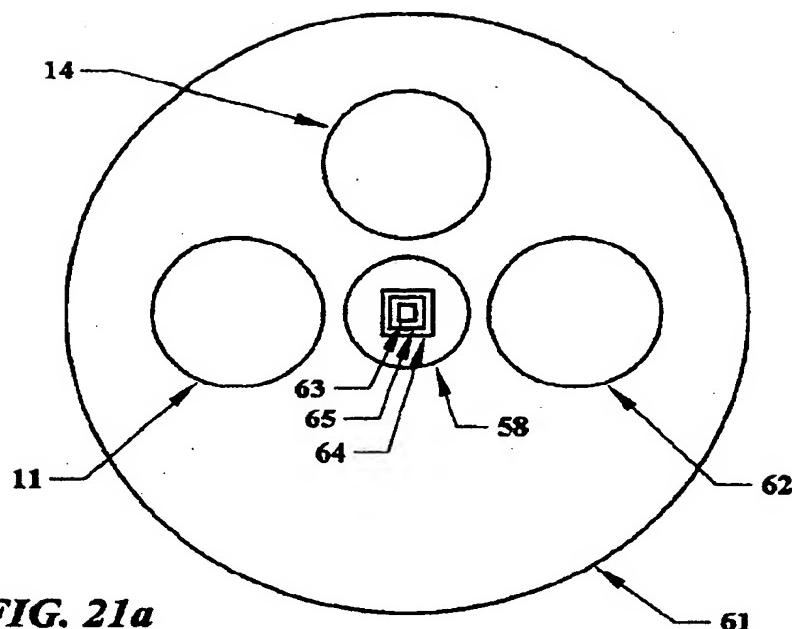
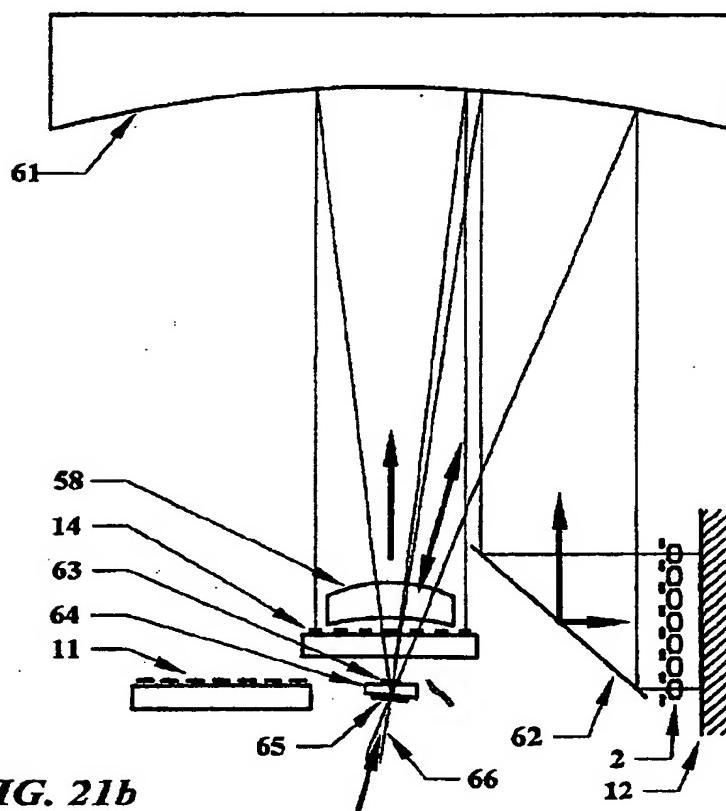


FIG. 20

【図21】

**FIG. 21a****FIG. 21b**

【図22】

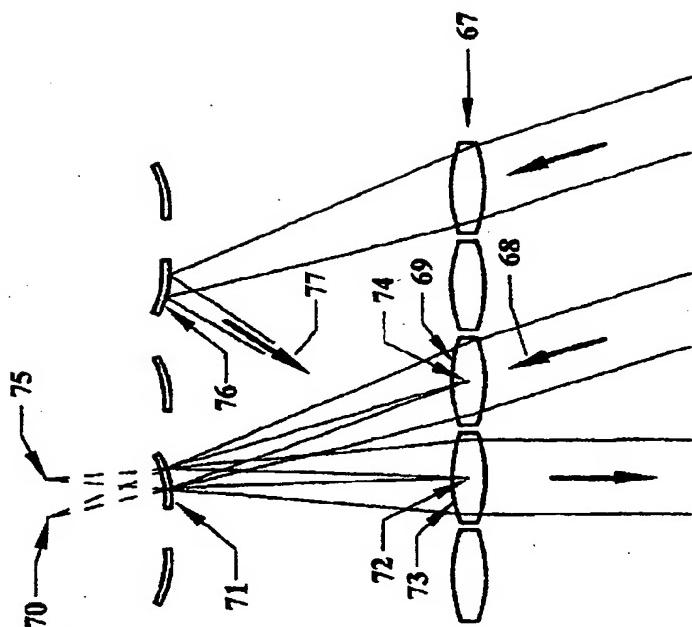


FIG. 22

【図23】

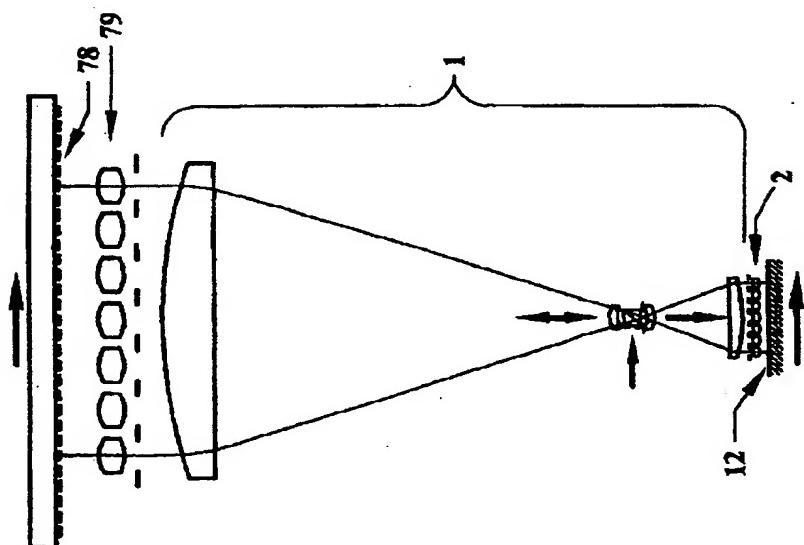


FIG. 23

【図24】

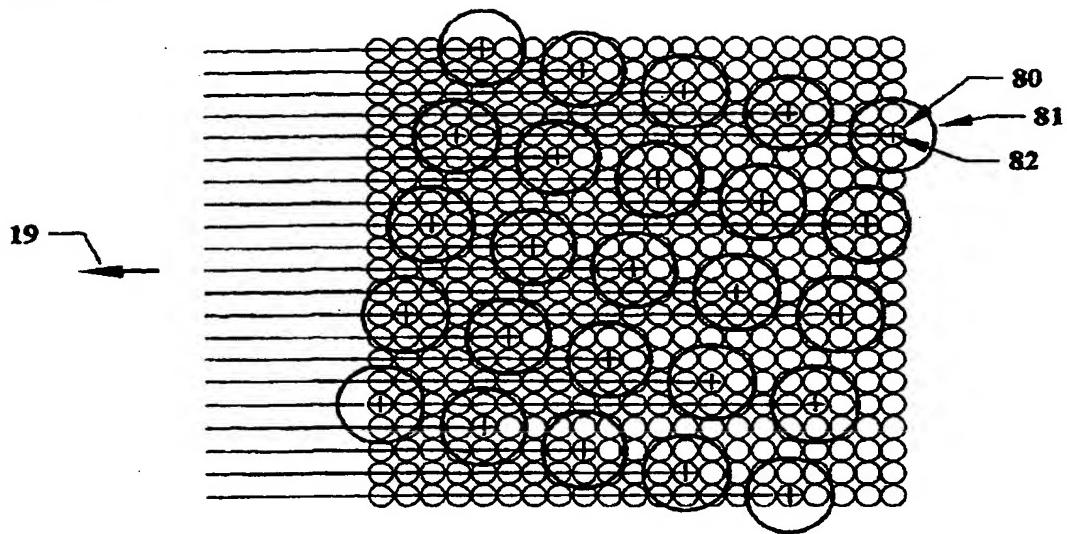


FIG. 24

【図25】

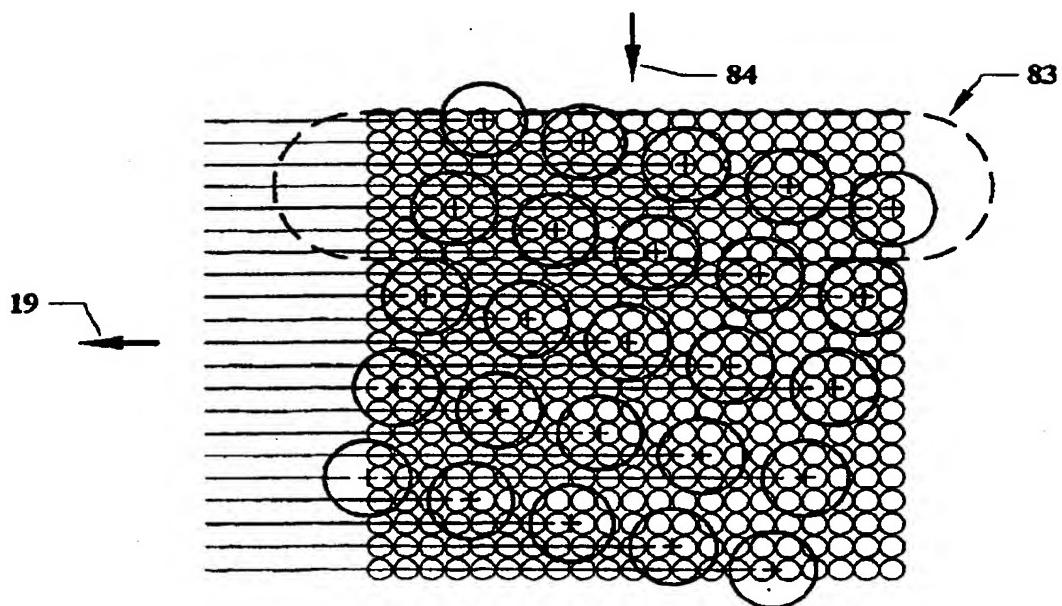


FIG. 25

【図26】

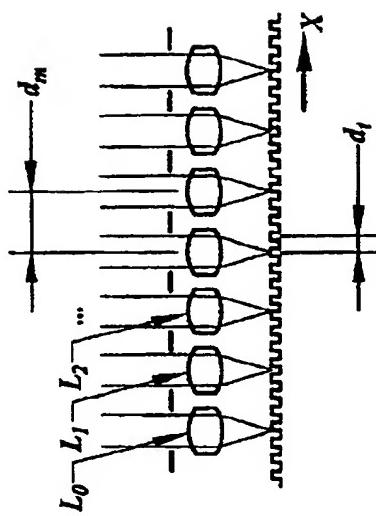


FIG. 26

【図27】

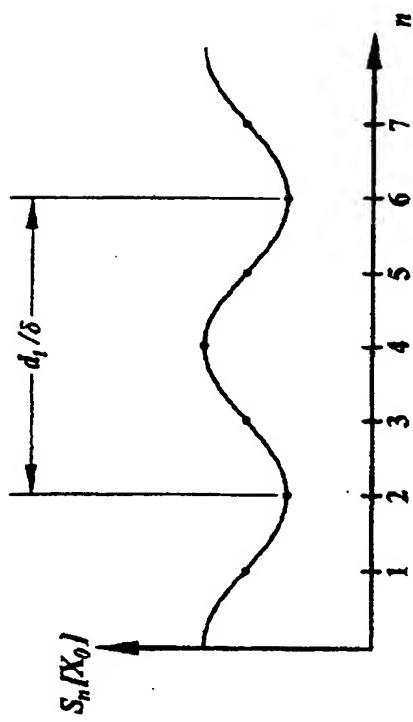


FIG. 27

【図28】

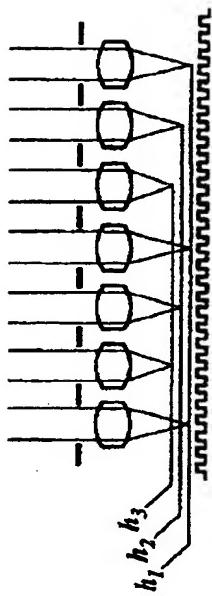


FIG. 28

【図29】

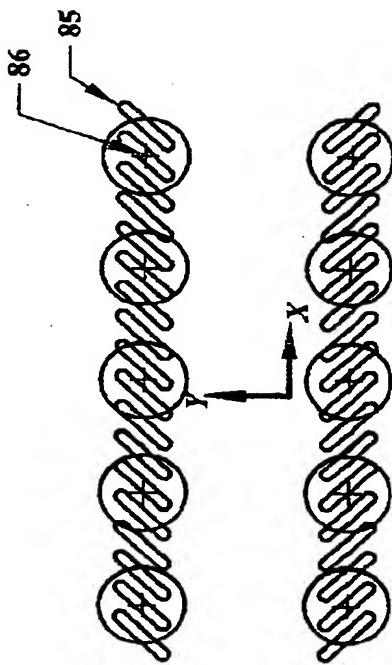


FIG. 29

【図30】

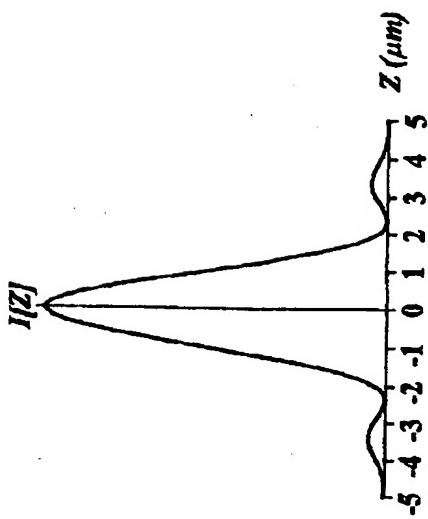


FIG. 30

【図31】

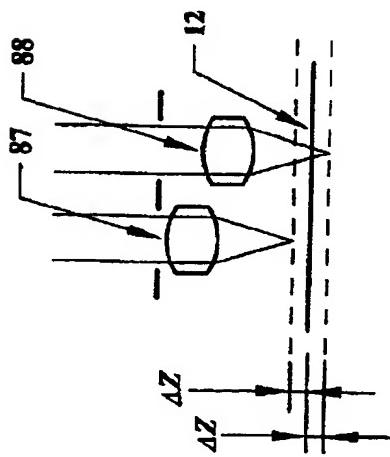


FIG. 31

【図32】

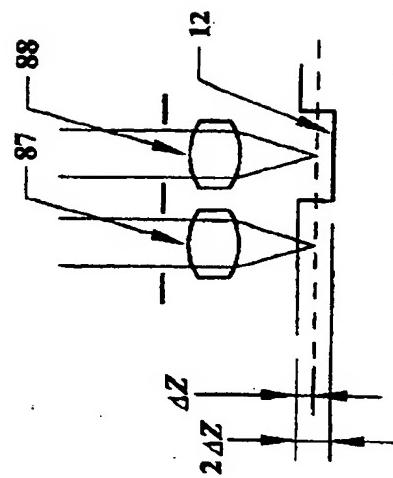


FIG. 32

【図33】

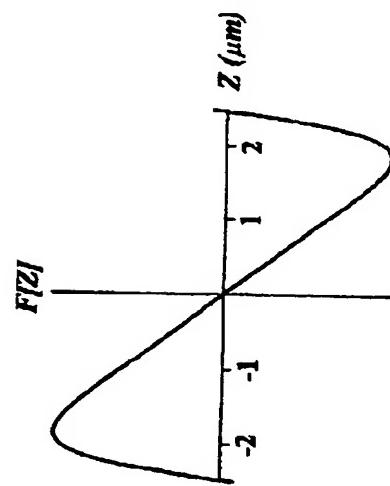
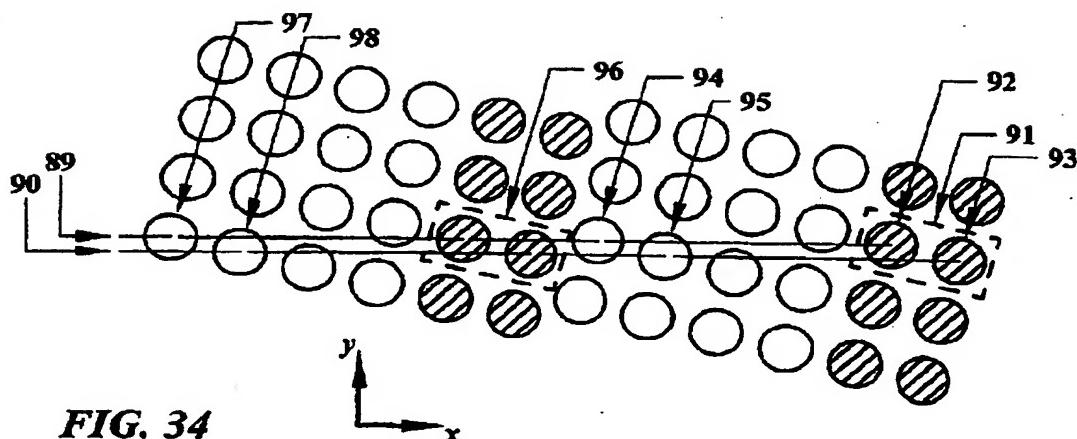


FIG. 33

【図34】



【図35】

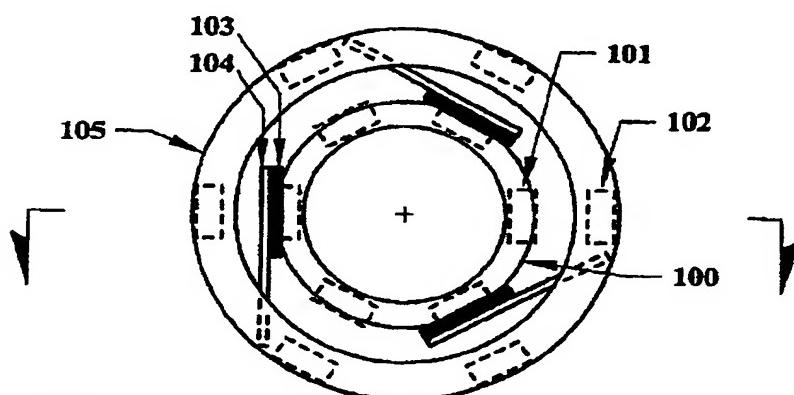


FIG. 35a

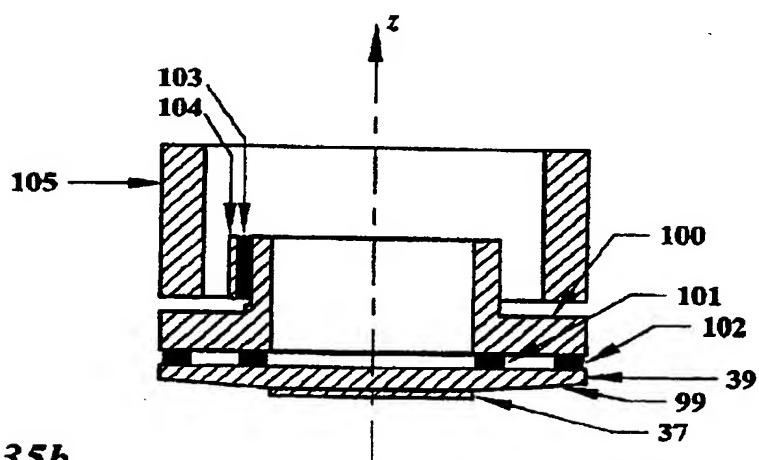


FIG. 35b

【図36】

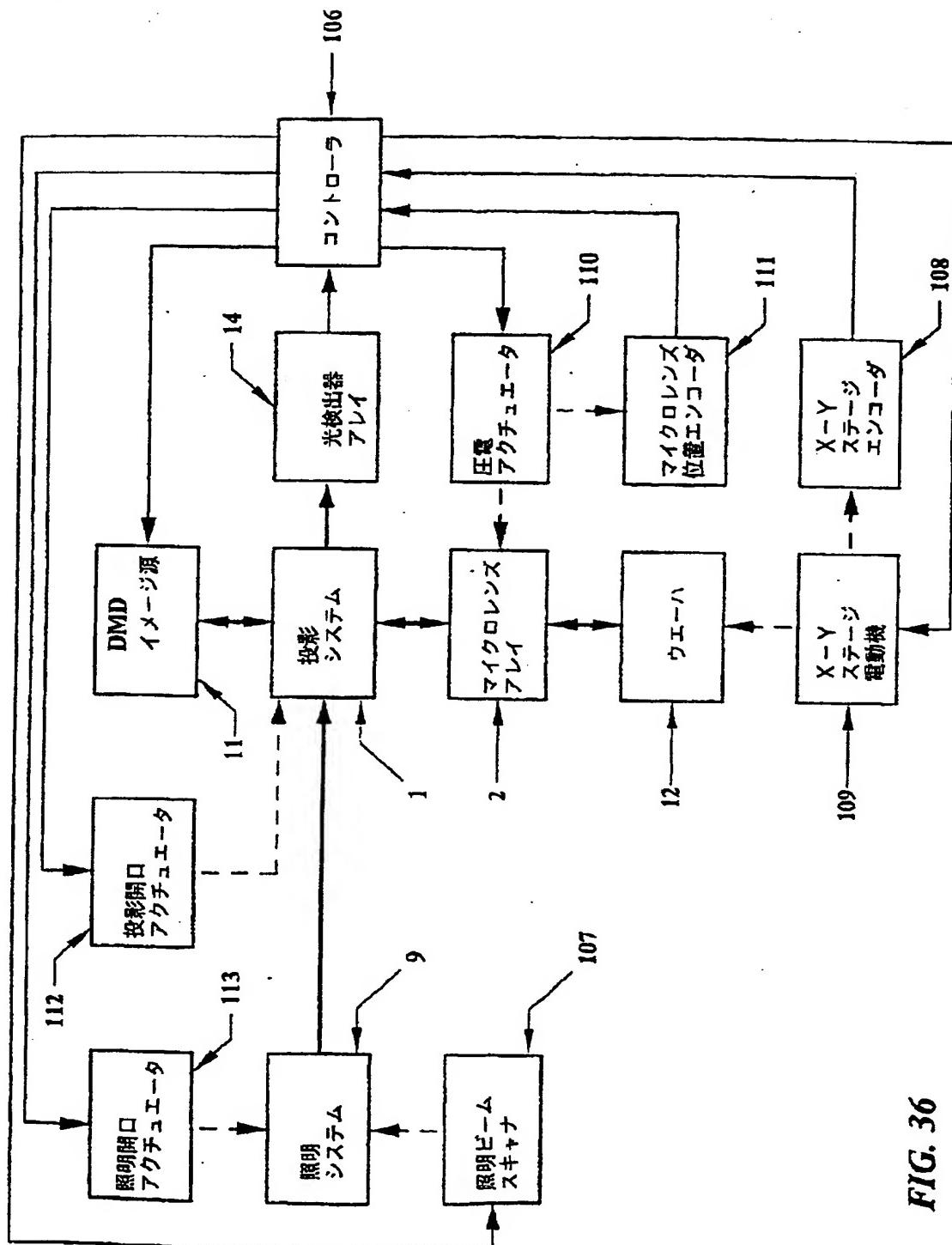


FIG. 36

## 【国際調査報告】

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.  
PCT/US97/02949

<b>A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER</b> IPC(S) :G02B 21/06, 27/38; G03B 21/14 US CL : 353/38, 122; 353/35, 71; 359/372, 385 According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
<b>B. FIELDS SEARCHED</b> Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) U.S. : 353/38, 63, 65, 66, 98, 99, 122; 355/44, 45, 50, 51, 55, 67, 68, 71; 359/368, 369, 372, 385, 389		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)		
<b>C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT</b>		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US, 5,659,420 E (WAKAI ET AL.) 19 AUGUST 1997 SEE ENTIRE DOCUMENT	1-46
A	US, 5,541,679 P (YANG) 30 JULY 1996 SEE ENTIRE DOCUMENT	1-46
A	US, 5,473,393 A (MANABE) 5 DECEMBER 1995 SEE ENTIRE DOCUMENT	1-46
A	US, 5,245,369 A (UM ET AL.) 14 SEPTEMBER 1993 SEE ENTIRE DOCUMENT	1-46
A	US, 5,225,929 A (ULANOWSKI) 6 JULY 1993 SEE ENTIRE DOCUMENT	1-46
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" documents defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "B" earlier document published on or after the international filing date "C" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reasons (as specified) "D" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "E" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed		
Date of the actual completion of the international search <b>21 NOVEMBER 1997</b>		Date of mailing of the international search report <b>24 DEC 1997</b>
Name and mailing address of the ISA/US Commissioner of Patents and Trademarks Box PCT Washington, D.C. 20231 Facsimile No. (703) 305-3230		Authorized officer <b>WILLIAM C. DOWLING</b> Telephone No. (703) 308-1287

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No. PCT/US97/02949
---

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US. 4,668,080 A (GALE ET AL.) 26 MAY 1987 SEE ENTIRE DOCUMENT	1-46
A	US. 4,289,377 A (MATSUI ET AL.) 15 SEPTEMBER 1981 SEE ENTIRE DOCUMENT	1-46

---

フロントページの続き

(81) 指定国 EP(AT, BE, CH, DE,  
DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, L  
U, MC, NL, PT, SE), OA(BF, BJ, CF  
CG, CI, CM, GA, GN, ML, MR, NE,  
SN, TD, TG), AP(KE, LS, MW, SD, S  
Z, UG), EA(AM, AZ, BY, KG, KZ, MD  
RU, TJ, TM), AL, AM, AT, AU, AZ  
BA, BB, BG, BR, BY, CA, CH, CN,  
CU, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, GB, G  
E, HU, IL, IS, JP, KE, KG, KP, KR  
KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV,  
MD, MG, MK, MN, MW, MX, NO, NZ, P  
L, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK  
TJ, TM, TR, TT, UA, UG, US, UZ,  
VN, YU

【要約の続き】

けるフォトマスクの必要性を排除する。